

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Obrábění materiálů skupiny H

Machining of Group H Materials

Student:

Jan Karger

Osobní číslo:

KAR0186

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Karger**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: Obrábění materiálů skupiny H  
Machining of Group H Materials  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Problematika obrábění materiálů skupiny H.
3. Návrh vhodných nástrojů a řezných podmínek.
4. Možnosti využití moderních technologií.
5. Diskuze experimentů.
6. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.  
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v trieskovém obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.  
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



Bakalářská práce

Fakulta strojní, VŠB – TUO

Karger Jan

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil informace a podklady z firmy Dormer Pramet s. r. o., Šumperk, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 18.5.2020



Podpis studenta

Bakalářská práce

Fakulta strojní, VŠB – TUO

Karger Jan

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§35 odst. 3 autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18.5.2020



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Karger

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Drozdov 18, Zábřeh, 789 01

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KARGER, J. *Obrábění materiálů skupiny H: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 53 s. Vedoucí práce: Vrba, V.

Bakalářská práce je směřována na obrábění tvrdých materiálů, které jsou zatříděny do skupiny H (dle ISO 513). Úvod této práce bude zaměřen na obecnou charakteristiku daného problému a popis firmy Dormer Pramet s. r. o., podrobný popis a rozdělení tvrdých materiálů a jejich další dělení do skupin. V druhé části je zaměřen na popis problematiky obrábění materiálů skupiny H, silového a tepelného namáhání břitu. Dále je práce zaměřena na volbu nástroje, řezné a záběrové podmínky. Následně se práce zabývá popisem technologie obrábění a možnostmi technologií HSC, HFC, a malého bočního úběru, jejich možnostmi a limity. V závěru práce se budu zabývat volbou a testování nového druhu řezného materiálu, a to včetně technologicko-ekonomického zhodnocení.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KARGER, J. *Machining of group H materials: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 53 p. Thesis head: Vrba, V.

The bachelor thesis is aimed at machining hard materials, which are classified in group H (according to ISO 513). The introduction of this work will focus on the general characteristics of the problem and the description of the company Dormer Pramet s. R. O., A detailed description and division of hard materials and their further division into groups. The second part focuses on the description of the machining of Group H materials, force and thermal stress of the cutting edge. Furthermore, the work is focused on the choice of tool, cutting and cutting conditions. Subsequently, the work deals with the description of machining technology and the possibilities of HSC, HFC, and small lateral removal, their possibilities and limits. At the end of the work I will deal with the selection and testing of a new type of cutting material, including technological and economic evaluation.

## Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU .....</b>	<b>10</b>
1.1 Společnost Dormer–Pramet .....	10
1.2 Definice dané oblasti .....	10
1.3 Popis materiálů skupiny H .....	11
1.4 Druhy zpevnění .....	12
1.4.1 Legování oceli .....	13
1.4.2 Tepelné zpracování.....	13
1.4.3 Chemicko-tepelné zpracování .....	15
1.4.4 Chemické zpracování .....	15
1.4.5 Mechanicko-tepelné zpracování .....	15
<b>2 PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ SKUPINY H .....</b>	<b>16</b>
2.1 Teorie tvorby třísky .....	16
2.2 Schéma tvoření třísky .....	17
2.3 Tepelné namáhání břitu – střední teplota řezání .....	20
2.3.1 Problémy při obrábění tvrdých materiálů .....	25
<b>3 TECHNOLOGIE VHODNÉ PRO OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ – jejich hlavní principy a limity.....</b>	<b>25</b>
3.1 Metoda HSC .....	25
3.2 Metoda HFC .....	28
3.3 Metoda malého bočního úběru .....	29
3.4 Konvenční technologie .....	31
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>38</b>
4.1 Vertikální obráběcí centrum MCV 1270 Power .....	40
4.1.1 Technické parametry stroje.....	40

---

4.2	Popis testovaných materiálu VBD.....	41
4.2.1	Materiál 7205 .....	41
4.2.2	Materiál M4303 .....	41
4.3	Průběh opotřebení na čele destiček při zkoušce na trvanlivost.....	42
4.4	Průběh opotřebení na hřbetu destiček při zkoušce na trvanlivost .....	43
4.5	Záznam o opotřebení hřbetu nástroje.....	44
<b>5</b>	<b>TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>51</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>52</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/symbol	Popis	Jednotka
ISO	Mezinárodní norma	[–]
HRC/HRA	Tvrdost prodle Rockwella	[–]
HSh	Tvrdost podle Shoreho	[–]
HV	Tvrdost podle Vickerse	[–]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu určená z trvalé deformace pod zatížením	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$\rho$	Měrná hmotnost obráběného materiálu	[g · cm <sup>-3</sup> ]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
l	Délka kontaktu třísky s čelem nástroje	[mm]
$\beta_1$	Úhel střížné roviny	[°]
N	Normálová síla	[N]
T/F <sub>z</sub>	Tangenciální složka řezné síly	[N]
$\varphi$	Třecí úhel	[°]
a	Tloušťka odebírané vrstvy	[mm]
a <sub>1</sub>	Tloušťka vzniklé třísky	[mm]
Q <sub>1</sub>	Teplo vznikající v oblasti primární deformace	[J]
Q <sub>2</sub>	Teplo vznikající třením ve styku tříska-čelo	[J]
Q <sub>3</sub>	Teplo tření ve styku hřbet-plocha řezu	[J]
Q <sub>4</sub>	Teplo vzniklé působením pružných deformací	[J]
Q <sub>c</sub>	Celkové množství tepla	[J]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[–]
SK	Slinutý karbid	[–]
PVD	Fyzikální napařování povlaku	[–]



Bakalářská práce	Fakulta strojní, VŠB – TUO	Karger Jan
CVD	Chemické napařování plynné fáze	[–]
RO	Rychlořezná ocel	[–]
CBN	Kubický nitrid bóru	[–]
$v_c$	Řezná rychlost	$[m \cdot min^{-1}]$
$f_n$	Posuv na otáčku	$[mm/ot]$
F	Řezná síla	[N]
T	Teplota	$[^{\circ}C]$
$T_1$	Teplota tavení obráběného materiálu	$[^{\circ}C]$
HSC	Vysokorychlostní obrábění	[–]
HFC	Obrábění vysokými posuvy	[–]
CAM	Počítačová podpora obrábění	[–]
$\kappa_r$	Úhel nastavení hlavního ostří	$[^{\circ}]$
ČSN	Česká státní norma	[–]
$VB_b$	Opotřebení na hřbetu nástroje	[mm]
$a_e$	Radiální hloubka řezu	[mm]
$a_p$	Axiální hloubka řezu	[mm]

## ÚVOD

V této oblasti technologie obrábění zkoumáme a měříme souvislosti procesu obrábění. Tyto procesy ovlivňujeme druhem a typem použitého obráběcího stroje, následné volby řezných nástrojů.

V dnešní době, kdy se třískové obrábění stále považuje za jeden z nejrozšířenějších technologických procesů, vzbuzuje zájem zdokonalovat řezné materiály. Jelikož obráběné materiály se neustále vyvíjí, mění se jejich mechanické vlastnosti a také schopnost materiálu být obroben. O materiály skupiny H je celosvětově velký zájem, především ve strojírenském průmyslu, nebo také automobilovém průmyslu, kde nalézá velké uplatnění.

Při neustálém vývoji tvrdých materiálů je nutné držet krok i s vývojem řezných materiálů, kterými je možné tyto materiály obrábět. Jednou ze společností, která se specializuje na vývoj a výrobu řezných nástrojů je společnost Dormer–Pramet s. r. o.

V dnešní době firma klade velký důraz na vývoj řezných materiálů a geometrií pro progresivní způsoby obrábění.

Bakalářská práce se zabývá obráběním tvrdých materiálů a byla realizována ve spolupráci s firmou Dormer–Pramet, která sídlí v Šumperku.

# 1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU

Zpracování bakalářské práce se týká porovnání dvou generací materiálů nástrojů ze SK pro firmu Dormer–Pramet. Cílem této práce je měření životnosti nástroje a následné porovnání mezi sebou. Na základě testu trvanlivosti určit technicko–ekonomické zhodnocení. Destičky byly otestovány při stejných řezných podmínkách a obráběly stejný materiál. Jedná se o materiál skupiny H, konkrétně nástrojovou ocel ČSN 19 552.

## 1.1 Společnost Dormer–Pramet

Společnost Dormer–Pramet vznikla sloučením dvou firem, a to firmy Dormer, společnosti, která se zabývá výrobou monolitních nástrojů a firmy Pramet, která se specializuje na vývoj a výrobou nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu.

Sloučení těchto firem pod obchodní značkou Dormer–Pramet přináší značnou výhodu v rozšíření nabídky sortimentu a propojení trhů. Svým stálým i budoucím zákazníkům zpřístupnila obsáhlé spektrum nástrojů vysoké kvality.

Firma nabízí komplexní sortiment a bohatou nabídku nástrojů pro všeobecné strojírenství – monolitní nástroje a nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami pro soustružení, frézování, obrábění otvorů a závitování. [1]

V dnešní době firma klade velký důraz na vývoj řezných materiálů a geometrii pro progresivní způsoby obrábění.

## 1.2 Definice dané oblasti

Jednou z nejdůležitějších činností při jakémkoliv návrhu technologie obrábění je správné zařazení obráběného materiálu. Zde se většinou vychází z normy ISO 513, která rozdělovala řezné materiály podle obráběných. Norma vznikla v 50. letech minulého století a ta rozdělovala obráběné materiály do třech základních skupin a to P, M, K. Tyto skupiny v sobě sdružovaly materiály vyvolávající kvalitativně stejné namáhání břitu, přičemž o způsobu namáhání břitu nám nejlépe referuje vznikající tříska.

V roce 2004 přišla jedna z posledních revizí této normy, která přidala ke třem původním skupinám další tři nové skupiny: N, S, H.

Uvedení typických představitelů jednotlivých skupin je uvedeno v následující tabulce č. 1.

<b>P</b>	-oceli uhlíkové (nelegované) třídy 10,11,12, -uhlíková ocelolitina sk. 26 (42 26..) -nízko a středně legované ocelolitiný sk. 27 (42 27..) -nástrojové oceli uhlíkové (19 1., 19 2.,19 3.), -legované nástrojové oceli (19 3.. až 19 8.), -nízko a středně legované oceli tř. 13 (13 0., 13 1., 13 2., 13 3.) -legované oceli třídy 14, 15, 16, -feritické a martenzitické korozivzdorné oceli (tř. 17 a lité 42 29..).
<b>M</b>	-austenitické a feriticko-austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné, -oceli nemagnetické a otěruvzdorné
<b>K</b>	-šedá litina nelegovaná i legovaná (42 24..) -tvárná litina (42 23..) a temperovaná litina (42 25..)
<b>N</b>	-slitiny mědi a hliníku a ostatní neželezné kovy
<b>S</b>	-speciální žárupevné slitiny na bázi niklu, kobaltu, železa, titanu
<b>H</b>	-zušlechtěné oceli s tvrdostí 48-60HRC -tvrzené kokilové litiny s tvrdostí 55-85 HSh

Tabulka 1: Přehled obráběných materiálů [2]

Ve své práci se dále zaměřím na skupinu H, jak bylo předesláno.

### 1.3 Popis materiálů skupiny H

Mezi tvrdé materiály lze řadit jen takové oceli, které splňují vysokopevnostní parametry, pro oceli se jedná o požadavek  $R_{p0,2} \geq 1500 [MPa]$ , který lze získat ze vzorce [3]:

$$R_m, R_{p0,2} \geq \frac{E}{150} \left[ \frac{Nm}{kg} \right]$$

$$\frac{R_m, R_{p0,2}}{\rho} \geq 0,2 \left[ \frac{Nm}{kg} \right]$$

Kde:

$R_m$  – mez pevnosti [MPa]

$R_{p0,2}$  – smluvní mez kluzu [MPa]

$E$  – modul pružnosti [MPa]

$\rho$  – hustota materiálu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

Tento vzorec představuje materiály, jejichž mez kluzu je velice blízká mezi pevností. Jedná se o materiály, které mají velice malou zásobu plastičnosti, proto charakter třísky je mezi litinou (tj. třískou bez, resp. s minimální plastickou deformací) a ocelí (tj. třískou s plastickou deformací). To znamená, že pro tyto materiály je charakteristická relativně malá plastická deformace, spolu s vysokým silovým zatížením, které je koncentrováno na relativně malou část čelní plochy nástroje.

V této skupině (H) nalezneme jak uhlíkové, tak slitinové oceli, ale také karbidické (bílé) a vytvrzené litiny. Podle mého názoru by do této skupiny měly být zařazeny i některé korozivzdorné oceli (martenzitické a precipitačně vytvrzené, které jsou zařazovány do skupiny M a rovněž superslitiny, tedy představitele skupiny S splňující výše uvedené pevnostní a tvrdostní charakteristiky.

Vzhledem k šíři této skupiny se zaměřím pouze na typické představitele skupiny H, a to na nástrojové oceli.

Požadované tvrdosti nástrojové oceli lze dosáhnout patřičným chemickým složením, tedy legováním, nebo ještě dalšími postupy, které bych rád ve zkratce probral v následující kapitole.

#### 1.4 Druhy zpevnění

Abychom dosáhli požadovaných mechanických vlastností je potřeba základní materiál zpevnit, toto nám zaručí následně specifikované druhy zpevnění, což jsou:

- **Zpevnění tuhého roztoku** – kolem rozpuštěných atomů v tuhém roztoku se vytváří napětí, které brání pohybu dislokací při plastické deformaci což má za následek zvýšení pevnosti tuhého roztoku.
- **Precipitační zpevnění** je zpevnění částicemi jiných fází.
- **Disperzní zpevnění** je zpevnění částicemi cizího původu.
- **Zpevnění hranicemi zrn** – pevnost či tvrdost materiálů roste s klesající velikostí zrn v jejich struktuře (s rostoucí plochou hranic zrn).
- **Deformační zpevnění:** Při tvárné deformaci roste hustota dislokací a následně dochází k jejich vzájemnému působení, což vede k velkému zpevnění při zhoršené tvárnosti a houževnatosti. [4]

Těchto druhů zpevnění prakticky dosahujeme:

### 1.4.1 Legování oceli

Již při samotné výrobě dochází ke zvýšení pevnosti přidáním legujících prvků. Což nám vytváří zpevnění tuhého roztoku, precipitační zpevnění, disperzní zpevnění a může nám způsobit zjemnění struktury.

Jen jako příklad uvedu vliv hlavních legujících prvků [4]:

- **Uhlík (C)**, který se zvyšujícím obsahem zvyšuje tvrdost. Pro konstrukční oceli je obsah 0,1 až 0,6 % pro nástrojové oceli od 0,6 do 1,5 %, kdy se jedná o zvláště tvrdé oceli.
- **Chrom (Cr), molybden (Mo) a (wolfram (W))** – tyto prvky zlepšují kalitelnost oceli, a ovlivňují tak u cementačních ocelí a ocelí k zušlechtnění obrobitelnost prostřednictvím struktury a pevnosti. U ocelí s vyšším podílem obsahu uhlíku, resp. legur tvoří tyto prvky tvrdé karbidy, které mohou negativně ovlivňovat obrábění.
- **Křemík (Si)**, který ve spojení s hliníkem vytváří tvrdé silikátové (křemík-oxidové) inkluze. Což může vést k rychlejšímu opotřebení nástroje.
- **Nikl (Ni)** také ovlivňuje pevnost oceli, ale zároveň zvyšuje houževnatost.
- **Titan (Ti) a Vanad (V)**, tyto prvky značně zvyšují růst pevnosti již při malém množství.
- **Mangan (Mn)** zvyšuje pevnost oceli a zároveň kalitelnost.

### 1.4.2 Tepelné zpracování

Změny struktury a tedy mechanických vlastností můžeme rovněž dosáhnout tepelným zpracováním a proto uvádím v této kapitole jeho stručný přehled.

**Žihání** – Dělí se na dva typy:

- Bez překrystalizace (teplota žihání je nižší než  $A_{c1}$ ), při ohřevu nedochází k fázovým přeměnám, avšak způsob rozložení feritu/cementitu se může změnit. Po výdrži na žihací teplotě následuje pomalé ochlazování v peci, což má za následek snížení vnitřního pnutí. Např. žihání na měkko.
- S překrystalizací jedná se o proces, kde jsou vyšší teploty než  $A_{c1}$ , kdy dochází k částečné nebo úplné překrystalizaci feriticko-cementické struktury. Cílem tohoto typu žihání je snížení vnitřního pnutí. Např. normalizační žihání.

Žíhání nám nepřispívá ke zvýšení pevnostní charakteristiky obráběného materiálu ba naopak, proto se dále zaměřím pouze na kalení a zušlechťování. [4]

**Kalení** – jedná se o tepelný cyklus složený z ohřevu na kalící teplotu → výdrže → rychlé ochlazení. Cílem tohoto zpracování je zvýšení tvrdosti, pevnosti a odolnosti proti opotřebení bez změny chemického složení oceli. Kalení se dělí na martenzitické a bainitické. (Martenzit je druhá nejtvrdší složka po karbidu železa ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )). [6]

Zde bych se zaměřil pouze na rekapitulaci základních pojmů: [4,6]

- Kalitelnost je schopnost oceli docílit martenzitické struktury (zakalit se). Ne všechny oceli jsou kalitelné tzn. ne u všech ocelí jsme schopni dosáhnout kalící (martenzitické či bainitické struktury).
- Zakalitelnost je schopnost oceli dosáhnout zakalením příslušné tvrdosti dané tvrdosti martenzitu. (Materiál polotovaru musíme volit s ohledem na požadovanou výslednou tvrdost součásti – např. pokud bude požadována tvrdost vyšší jak 60HRC nemůžeme materiál volit nástrojovou ocel ČSN 19 522. Protože u tohoto materiálu nelze dosáhnout tak vysoké tvrdosti a je nutno zvolit jinou ocel např. ČSN 19 436).
- Prokalitelnost, schopnost oceli docílit tvrdosti danou zakalitelností do určité hloubky pod povrchem. (Pokud máme polotovar o větším objemu, musíme počítat s tím, že požadované tvrdosti bude dosaženo pouze v povrchové vrstvě a směrem ke středu obrobku bude tvrdost klesat).

Oblast teplot pro výše zmíněné typy tepelného zpracování jsou uvedeny v následujícím diagramu (výřez diagramu Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  viz obr. č. 1).



Obrázek 1: Diagram kalící teploty pro Fe-  $\text{Fe}_3\text{C}$  [4]

**Popouštění** – jedná se o ohřev, který následuje obvykle ihned po předešlém zakalení na martenzitickou strukturu, jejímž základem jsou nerovnovážné fáze tetragonálního martenzitu a zbytkový austenit. Zvyšováním teploty probíhají v oceli pochody, které ji přibližují k rovnovážnému stavu. [4]

**Zušlechťování** – pojem, kterým rozumíme kalení oceli s následným popouštěním za vysokých teplot (350 až 680 °C), kdy získáme oceli s jemnou strukturou (zvýšení pevnosti a houževnatosti). K tomuto procesu jsou používány legované i nelegované oceli pro zušlechťování (konstrukční oceli s obsahem C od 0,40 do 0,60 %). [4]

#### 1.4.3 Chemicko-tepelné zpracování

Je typickým příkladem disperzního zpevnění. Cílem chemicko-tepelného zpracování je difuzní obohacení povrchových vrstev ocelových součástí. Obohacením přidáním některého prvku dosáhneme zvýšení vlastností (tvrdost, odolnost proti opotřebení a korozi). Nejčastěji používaný prvek povrchovému syčení je uhlík (C), dusík (N) nebo jejich kombinace. [4]

Při tepelném zpracování dochází k vytvoření hlubší vrstvy (cca 0,2 až 1 mm některá odborná literatura uvádí až 1,5mm), při následném tepelném zpracování (kalení, popouštění), lze docílit požadovaných vlastností. Do tohoto zpracování lze zařadit cementování, nitridování a jejich kombinace nitrocementování. [4]

#### 1.4.4 Chemické zpracování

Dalším způsobem zvyšování mechanických vlastností je chemické zpracování, kterým se tvoří velmi tenké difuzní vrstvy (max. do 0,1 mm). U této skupiny jsou mechanické vlastnosti dosažené okamžitě a není nutné je dále tepelně zpracovávat. V této skupině se vyskytuje např. chromování, vanadování apod. [4]

#### 1.4.5 Mechanicko-tepelné zpracování

Dalším, silně rozšiřujícím způsobem zlepšování mechanických vlastností obrobku je mechanicko-teplené zpracování. Jedná se o metalurgický proces, který kombinuje proces mechanické nebo plastické deformace (kování, lisování, válcování atd.), s tepelným zpracováním jako je kalení, žíhání a popouštění. [4]

Takto upravené (zušlechtěné) oceli je možné zakoupit pod příslušným označením. Značí se pomocí doplňkové číslice (6; 7; 8), která se nachází za tečkou např.: (12 061.6) viz Tab.2. Případně tabulku s mechanickým zpracováním viz Tab.3. [4]



Doplňková číslice	Stav
1x xxx.0	Tepelně zpracovaný
1x xxx.1	Normalizačně žíhaný
1x xxx.2	Žíhaný (s uvedením způsobu žihání)
1x xxx.3	Žíhání na měkko
	Žíhaný se zárukou mikrostruktury
1x xxx.4	Kalený
1x xxx.5	Normalizačně žíhaný a popouštěný
1x xxx.6	Zušlechťený na dolní pevnost
1x xxx.7	Zušlechťený na střední pevnost
1x xxx.8	Zušlechťený na horní pevnost
1x xxx.9	Podle zvláštního ujednání

Tabulka 2: Označení tepelného zpracování [7]

doplňková číslice	Stupeň přetváření	
	Pásky ocelové válcované za studena	Plech ocelové válcované za tepla
1x xxx . x 0	dále za studena nepřeválcovaný	
1x xxx . x 1	za studena lehce převálcovaný	
1x xxx . x 2	čtvrťtvrdý	za studena doválcovaný a nežíhaný
1x xxx . x 3	polotvrdý	za studena doválcovaný a žíhaný
1x xxx . x 4	3 / 4	
1x xxx . x 5	4 / 4	
1x xxx . x 6	5 / 4	
1x xxx . x 7	netvoří čtyřlístky mechanických vlastností	
1x xxx . x 8	speciálně zpevněný	
1x xxx . x 9	stupeň přetváření dle zvláštního ujednání	

Tabulka 3: Označení mechanického zpracování – stupeň přetváření [4]

Díky těmto mechanickým vlastnostem vyvolávají „tvrdé“ materiály velice specifické namáhání nástroje, které bych rád podrobněji probral v následující kapitole.

## 2 PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ SKUPINY H

### 2.1 Teorie tvorby třísky

Proces odřezávání třísky při obrábění je velmi složitým fyzikálním pochodem, který závisí na vzájemném působení obrobku a břitu nástroje. Celý proces obrábění se vyznačuje řadou různých jevů, jako jsou pružné a plastické deformace odřezávané vrstvy, tření třísky o čelo nástroje, resp. hřbetu o plochu řezu a dále tepelné jevy. Účinek těchto jevů na funkční plochy břitu se projeví po určité době obrábění jejich opotřebením a posléze otupením břitu. Charakter otupení může být různý a závisí na jejich společném účinku. [4]

Přeměna odřezávané vrstvy materiálu v třísku probíhá podle vlastností obráběného materiálu ve větší či menší míře cestou plastických deformací, které jsou základním

určujícím jevem procesu obrábění. Na velikosti plastických deformací závisí vznik tepla, charakter tření mezi funkčními plochami nástroje a obráběným materiálem i průběh opotřebení břitu.

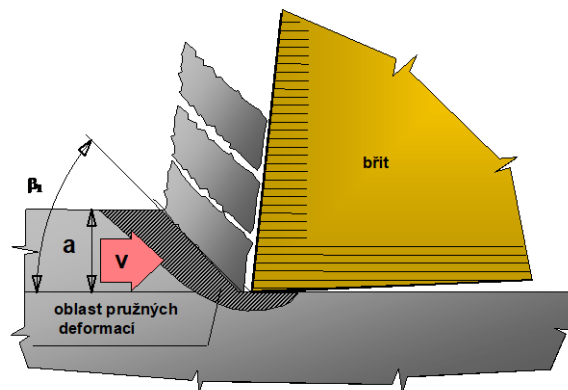
Velikost plastické deformace je závislá na plasticitě obráběného materiálu. U materiálů, které nejsou plastické (šedá litina), vzniká tříska plasticky velmi málo deformovaná. Její účinek na břit je kvalitativně odlišný od třísky, která vzniká při obrábění plastických materiálů např. ocelí.

Podle charakteru namáhání břitu probíhá i jeho opotřebení buď otěrem jeho funkčních ploch, nebo mechanickým porušením. Opotřebení břitu je odrazem průběhu procesu tvoření třísky.

## 2.2 Schéma tvoření třísky

V jednoduchosti můžeme obráběné materiály rozdělit do dvou základních skupin. Na ty, které vytvářejí třísku bez, respektive s minimální plastickou deformací a na ty, které vytvářejí třísku plasticky deformovanou.

**NETVÁŘENÁ** – tříska se oddělí křehkým lomem (bez plastické deformace – štěpením) → odtržením → převládají tahová napětí. Model tvoření třísky materiálů s malou plasticitou (např. šedá litina) je zobrazen na obr. č. 2.



Obrázek 2: Model třísky – šedá litina [4]

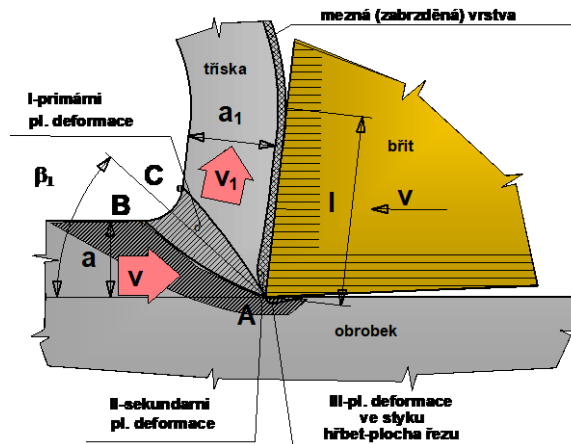
**TVÁŘENÁ** – tříska vznikne vlivem zatížení odřezávané vrstvy, spojené s její PD → tváření → odstřižení → převládající tangenciální napětí.

Tvářené třísky rozdělujeme na tyto poddruhy: - elementní

- článkovitá

- plynulá

Všeobecně akceptovatelný model tvoření třísky plasticky deformované třísky je schématicky znázorněn na obr. č. 3.



Obrázek 3: Model plasticky deformované třísky [4]

Vstupuje-li klínovitý břit do materiálu, vzniká před jeho čelem nejdříve pružná deformace. To znamená, že kdyby v tomto okamžiku přestala řezná síla působit, vrátil by se materiál do původního stavu.

Břit, který odřezává z obrobku určitou vrstvu o tloušťce „ $a$ “ úměrnou posuvu, vyvolává v této vrstvě napětí, které vede k její plastické deformaci v určité oblasti ABC, která předchází břitu. V této oblasti probíhá *primární plastická deformace* v celém průřezu odřezávané vrstvy, která ji přeměňuje v třísku, její tloušťka „ $a$ “ se zvětší na tloušťku třísky „ $a_1$ “. Současně se zmenší rychlost, kterou odchází tříska po čele na hodnotu „ $v_1$ “. [4]

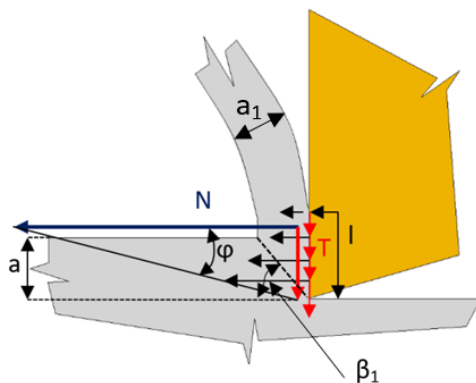
$$k = \frac{a_1}{a}$$

Poměr mezi „ $a_1$ “ a „ $a$ “ se nazývá *součinitelem pěchování třísky* a je hlavním ukazatelem stupně plastické deformace při úběru třísky.

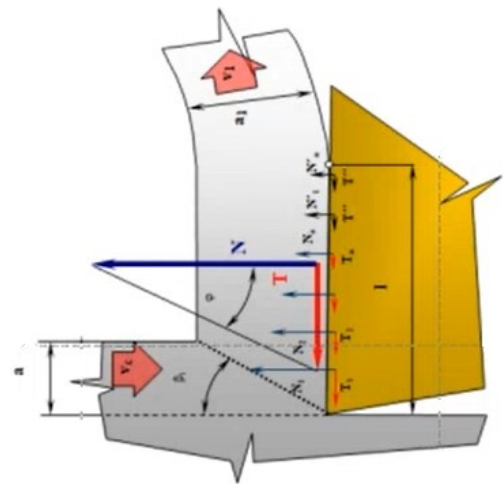
Čím větší je součinitel pěchování třísky, tím větší je plastická deformace odřezávané vrstvy, tím větší jsou řezné síly a řezná teplota a tím i zatížení břitu.

Součinitelem pěchování třísky „ $k$ “ je závislý na mechanických vlastnostech především na plasticitě obráběného materiálu, na řezných podmínkách (zejména na řezné rychlosti a posuvu) a na geometrii břitu (hlavně na úhlu čela).

V porovnání tvorby třísky u tvrdých materiálů (obr. č. 4) s běžnou měkkou konstrukční ocelí (obr. č. 5) je možné vidět rozdíl tloušťky třísky. Kdy při obrábění měkké konstrukční oceli je podstatně větší kontakt třísky s čelem nástroje. Kdežto tvrdá ocel se daleko méně pěchuje oproti měkkým ocelím, protože jak bylo řečeno dříve, tyto materiály jsou typické tím, že mez kluzu je podstatně blíže mezi pevnosti, než je tomu u běžných konstrukčních ocelí. Tříska při obrábění tvrdých ocelí má daleko menší kontakt s čelem nástroje a zároveň se tříska daleko méně pěchuje oproti měkké oceli, což znamená, že i rychlost odchodu třísky po čele bude podstatně větší, než je tomu u konstrukční oceli. [4]



Obrázek 4: Síly – tvrdé materiály [4]



Obrázek 5: Síly – měkká ocel [4]

Pro obrábění tvrdých materiálů se tedy doporučuje používat řezné materiály velice otěruvzdorné, (a aby byla zaručena dobrá provozní spolehlivost, tak se doporučuje použití zejména v negativnějších geometriích).

$I$  – délka kontaktu třísky s čelem nástroje

$\beta_1$  – úhel střížné roviny (u tvrdých materiálů je větší než u měkké oceli)

$N$  – normální síla (vynaložený tlak působící na destičku)

$T$  – tangenciální složka řezné síly (generuje množství vzniklého tepla)

$\varphi$  – třecí úhel (součinitel tření)

Tangenciální složka řezné síly „ $T$ “, která nám generuje množství tepla vzniklého v oblasti sekundární plastické deformace. Lze vypočítat ze vztahu  $T = N \cdot \varphi$ .

U tvrdých materiálů máme daleko větší normálovou sílu, která díky menšímu kontaktu třísky s čelem nástroje působí na menší ploše, ale také má menší tečnou sílu.

Tvorba třísky u materiálů skupiny H je velmi specifická. Z hlediska zatížení břitu nástroje a samozřejmě v závislosti na mechanických vlastnostech obráběného materiálu se pohybujeme někde mezi oběma modely představenými v úvodu této kapitoly. Při standardním obrábění se tříska přibližuje spíše modelu typickému pro obrábění litin (krátká – viz obr. č. 2), ale při aplikaci nestandardních způsobů obrábění (HSC, HFC) se způsob namáhání nástroje shoduje spíše s druhým modelem, který je typický pro obrábění materiálů s plastickou deformací (viz obr. č. 3). [4]

V mé práci se s ohledem na obráběný materiál a zvolenou konvenční technologii zaměřím pouze na jeden model, a to model plasticky deformované třísky (viz obr. č. 3), který dle mého názoru více odpovídá tomu, co se s nástrojem děje.

V úvodu kapitoly jsem popsal děje při vzniku třísky z hlediska mechanického. V následující kapitole bych si dovilil předložit svůj pohled na tvorbu třísky z hlediska teplotního.

### **2.3 Tepelné namáhání břitu – střední teplota řezání**

Při obrábění vznikají na břitu VBD teploty, které v závislosti na obráběném materiálu a řezných podmínkách mají zásadní vliv na opotřebení břitu po kvalitativní i kvantitativní stránce. Při obrábění přerušovaným řezem, např. frézování, se teplota funkčních ploch periodicky mění, čímž vznikají teplotní rázy, které mají za následek specifický typ opotřebení břitu, vznik hřebenových trhlin. Naopak při nízkých řezných teplotách se stabilizuje na břitu nárůstek, který působí na obrábění vcelku negativně.[4]

#### **Energetická rovnováha řezného procesu**

Prakticky veškerá mechanická energie vynaložená při obrábění na pružné a plastické deformace odřezávané vrstvy a na tření mezi třískou a čelem, resp. hřbetem a plochou řezu se přemění v teplo.

Podle výsledků prací publikovaných různými autory se na teplo přemění 99 až 99,5% energie vynaložené na oddělení třísky.

Energetická rovnováha řezného procesu vychází z toho, že celkové množství tepla vzniklého při obrábění za jednotku času je dáno vztahem:

$$Q_c = F_z \cdot v_c \text{ [J/min]}$$

Kde:	$Q_c$ = celkové množství tepla vzniklého při obrábění	[J/min]
	$F_z$ = tangenciální složka řezné síly	[N]
	$v_c$ = řezná rychlost	[m/min]

Intenzita plastických deformací v oblasti tření mezi třískou a čelem (*oblast sekundární plastické deformace*) řádově převyšuje stupeň plastické deformace v oblasti tvoření třísky, vzniká zde v malém objemu obráběného materiálu velké množství tepla. Teplota v oblasti tvoření třísky je menší než teplota ve styčné ploše mezi třískou a čelem VBD. Tříška se v oblasti primární deformace ohřeje v průměru na 250 až 450°C, kdežto v oblasti sekundární plastické deformace na čele VBD jsou teploty podstatně vyšší (800 až 1000°C). [12]

Celkové množství tepla vzniklého při obrábění je dáno součtem:

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \text{ [J/min]}$$

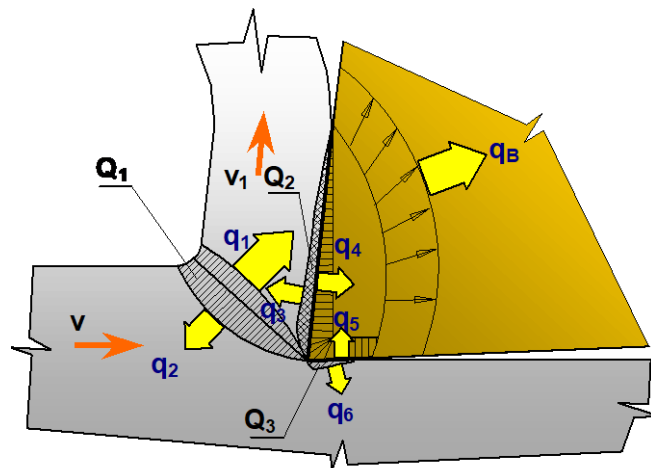
Kde:

$Q_1$  = teplo vzniklé plastickou deformací v oblasti tvoření třísky [J/min]

$Q_2$  = teplo vzniklé třením ve styku tříška-čelo [J/min]

$Q_3$  = teplo tření ve styku hřbet-plocha řezu [J/min]

$Q_4$  = teplo vzniklé působením pružných deformací [J/min]



Obrázek 6: Schéma prostupu tepla [4]

Při obrábění plastických materiálů je množství tepla  $Q_4$  zanedbatelné, avšak při obrábění křehkých materiálů (např. litiny) může být podíl tepla  $Q_4$  na celkovém množství tepla  $Q_c$  při obrábění podstatný.

Při obrábění křehkých materiálů (litina, bronz aj.) je velikost plastické deformace odřezávané vrstvy (která se obvykle omezí jen na oblast přiléhající k čelu) velmi malá a tedy i složka  $Q_1$  tu bude malá. Jestliže vzniká drobná tříska, je styková plocha mezi třískou a čelem nástroje velmi úzká, takže i složka  $Q_2$  obvykle dosahuje menších hodnot než u oceli. Potom hlavním zdrojem tepla při obrábění křehkých materiálů bude tření ve styku hřbet-plocha řezu (teplo  $Q_3$ ) a práce pružných deformací (teplo  $Q_4$ ). Poněvadž však při pružné deformaci vzniká podstatně méně tepla než při plastické deformaci, budou střední řezné teploty při obrábění litiny menší, než jsou teploty při obrábění oceli za stejných podmínek.[4]

Množství tepla  $Q_1$  vzniklé v oblasti tvoření třísky odchází z větší části s třískou. Schématicky je toto množství tepla na obr. č. 6 označeno  $q_1$ . Menší část tepla vzniklého plastickou deformací v oblasti tvoření třísky přechází do obrobku. Toto množství je označeno  $q_2$ . Do třísky přechází i část tepla  $q_3$ , které vznikne ve styku tříska-čelo, viz obr. č. 6. Celkové množství tepla, které přejde do třísky, je potom:[4]

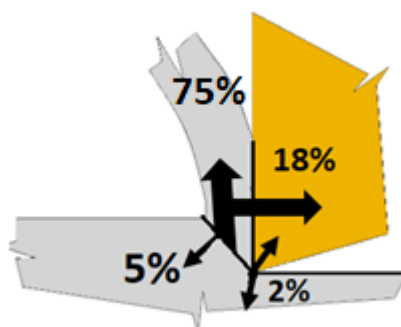
$$q_t = q_1 + q_3 \text{ [J/min]}$$

Do břitu přechází jednak část tepla  $q_4$  vzniklého třením ve styku tříska-čelo a jednak teplo z tření na hřbetě  $q_5$ . Celkové množství tepla odvedené břitem nástroje je potom dáno součtem:[4]

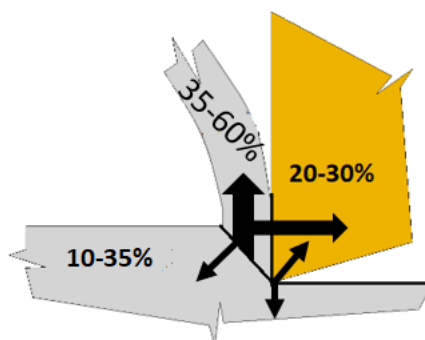
$$q_B = q_4 + q_5 \text{ [J/min]}$$

Toto teplo se odvádí břitem do tělesa nástroje. Část tepla z tření ve styku hřbet-plocha řezu ( $q_6$ ) přechází do obrobku.

Převážná část tepla vzniklého při řezání tedy zůstává v třísce. U plastických materiálů odchází v třísce 60 až 90% celkového množství tepla  $Q_c$ . U litiny odchází v třísce 35 až 60% celkového množství tepla. [4]



Obrázek 7: Distribuce tepla v materiálech tvořící plasticky deformovanou třísku.



Obrázek 8: Distribuce tepla v materiálech tvořící třísku bez plastické deformace.

Podíl tepla odvedeného nástrojem je v rozmezí 0,5 až 30 %, podle vlastností obráběného materiálu a rezných podmínek.

Do obrobku přejde 5 až 50% veškerého tepla vzniklého při obrábění. Část tepla se odvede do okolní atmosféry.

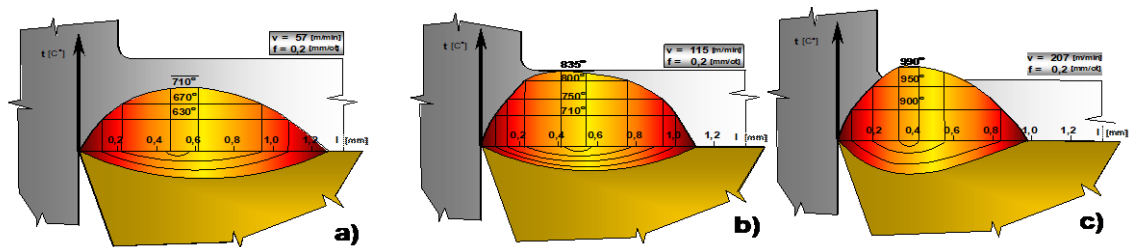
Velmi významnou roli hraje i tepelná vodivost obráběného materiálu. Například při obrábění austenitických ocelí a žárupevných slitin na bázi Ni ovlivňuje jejich nízká tepelná vodivost velmi nepříznivé opotřebení břitu, který odvede v průměru více než dvojnásobné množství tepla v porovnání s případem obrábění běžných ocelí.[4]

Teplota kontaktní plochy mezi třískou a čelem VBD není rozdělena rovnoměrně. Na čele vzrůstá ve směru pohybu třísky a přibližně uprostřed stykové plochy dosahuje maxima a dále opět klesá. Maximum teploty styku se shoduje s maximální hloubkou výmolu na čele VBD.[4]



Příklad rozdělení teplot je v obr. č. 9, kde je naznačeno rozdělení teplot naměřené při soustružení oceli 12 041 posuvem  $f = 0,21 \text{ mm/ot}$ , řeznými rychlostmi  $v = 57, 115$  a  $208 \text{ m/min}$ . [4]

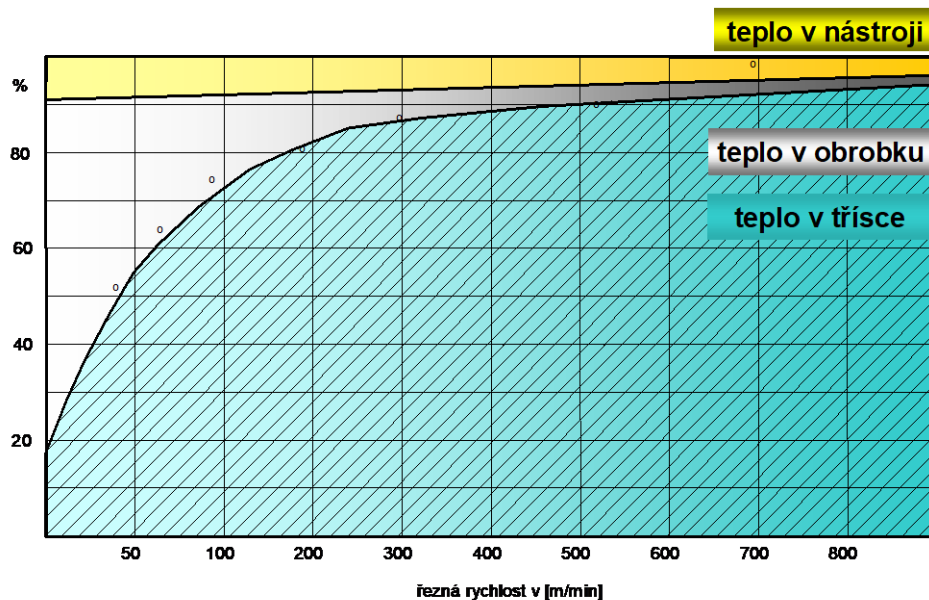
Střední teplota řezání je závislá především na řezné rychlosti a posuvu, hloubka řezu ji ovlivňuje poměrně málo.



Obrázek 9: Příklad rozdělení teplot [4]

S rostoucí řeznou rychlostí se zkracuje doba na odvedení tepla  $q_2$  do obrobku, a proto vzrůstá procentní podíl tepla  $q_1$  odvedeného třískou.

Zároveň se zmenšuje procentní podíl tepla, které je odváděno břitem a obrobkem. Na obr. č. 10 je schéma rozdělení tepla mezi třísku, břit nástroje a obrobek v závislosti na řezné rychlosti při obrábění oceli.



Obrázek 10: Schéma rozdělení tepla mezi třísku – nástroj – obrobek [4,20]

Tento jev je jedním ze základních kamenů tzv. vysokorychlostního obrábění (HSC, resp. HSM).

### 2.3.1 Problémy při obrábění tvrdých materiálů

Hlavním cílem obrábění tvrdých materiálů je snížení doby obrábění, zvýšení kvality povrchu, efektivnější odvod tepla z místa řezu, snížení ekonomické náročnosti při výrobě, omezení problémů vznikající při obrábění tvrdých materiálů. [13]

Příklady problémů vznikající při obrábění tvrdých materiálů mohou být např.:

- vysoké teploty v místě řezu, z čehož vyplývá vyšší rychlost opotřebení bříty, případně poškození VBD,
- vysoký tlak na malé ploše, a ještě v blízkosti ostří,
- při obrábění zvýšené napětí v obrobku (v důsledku tepelných deformací),
- technologicky nemožné, nebo nedostatečné chlazení,
- proměnlivá velikost řezných sil,
- nedostatečná stabilita (stroj-nástroj-obrobek-přípravek).

## 3 TECHNOLOGIE VHODNÉ PRO OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ – jejich hlavní principy a limity

### 3.1 Metoda HSC

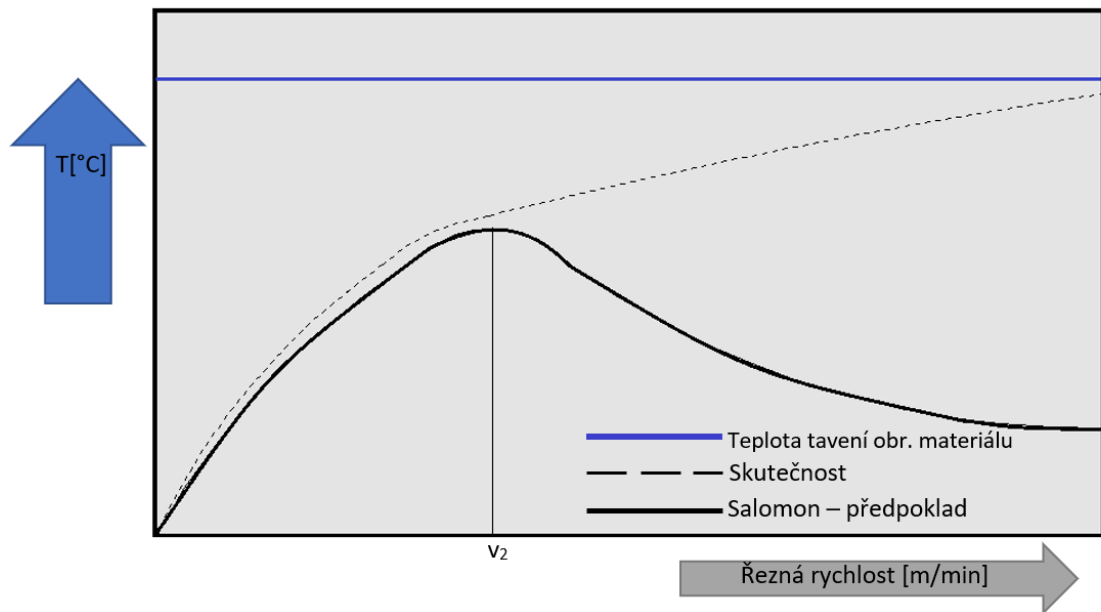
Hlavními motivy pro aplikaci vysokorychlostního obrábění lze shrnout do několika bodů:

- Zvýšení intenzity úběru,
- zlepšení jakosti obráběného povrchu (drsnost, zbytkové pnutí atd...),
- snížení úrovně řezných sil,
- snížení podílu tepla odvedeného do obrobku (zvýšení přesnosti),
- omezení nebezpečí chvění (přesun řezných podmínek mimo rozsah kritických vibrací).

Jednou z prvních oblastí, kde bylo prakticky využito výhod vysokorychlostního obrábění byl letecký průmysl, kde našla tato technologie uplatnění při obrábění výztuh křídel letadel. Při obrábění výztuh běžnou standardní technologií se vlivem teplot obrobek deformoval (kroutil).

S první teorií vysokorychlostního obrábění přišel pan Salomon, který v roce 1930. Tato teorie tvrdí, že při narůstající řezné rychlosti stoupá i teplota řezání, ale v určité řezné rychlosti začne teplota řezání klesat až se ustálí na určité hodnotě (viz obr. č. 11). Tuto teorii

dokonce prakticky ověřil. Aby dosáhl požadované řezné rychlosti použil nástroj velkého průměru (několik metrů) a relativně úzký obrobek. Teprve o přibližně 30 let později, ale vědci zjistili, že tato teorie není zcela správně, když zkoušeli experiment na vysokorychlostním stroji zjistili, že teplota řezání se shodovala do bodu „ $v_2$ “ poté stále narůstala až se asymptoticky blížila teplotě tavení obráběného materiálu. Rozdíl byl v záběrových podmínkách, kdy pan Salomon zabíral pouze „části frézy“ (malým úhlem záběru). Dnes se této teorie využívá u metody bočního úběru. [4]



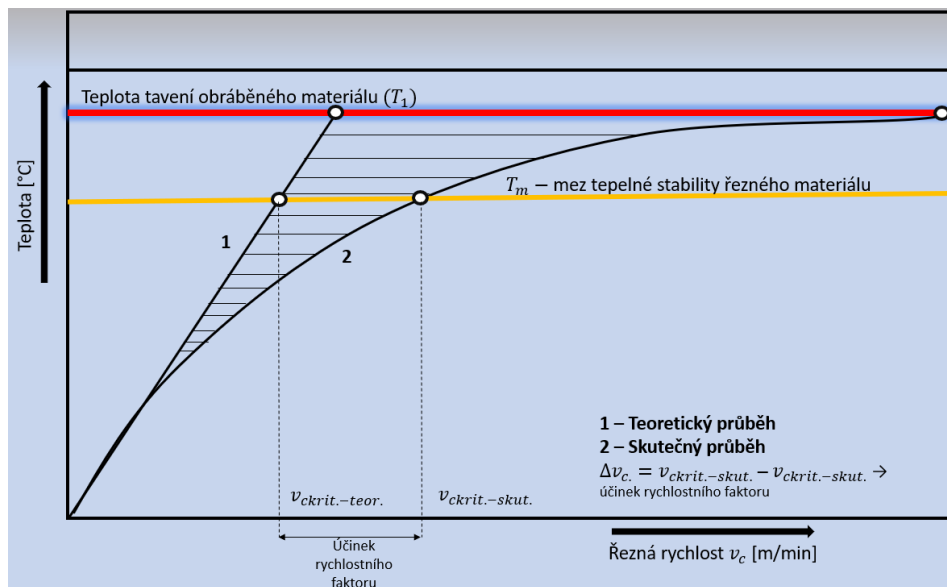
Obrázek 11: Předpokládaná závislost teploty řezání na řezné rychlosti [4]

U vysokorychlostního obrábění se vychází ze vztahu energetické rovnováhy řezného procesu  $Q_c = F \cdot v_c$  [J/min] (viz obr.č. 12).

Kde:  $Q_c$  – celkové množství tepla [J]

$F$  – řezná síla [N]

$v_c$  – řezná rychlost [m/min]



Obrázek 12: Graf závislosti řezné rychlosti na teplotě [20]

Z obrázku č.12 je patrné, že není nutné se dostat čistě do oblasti vysokorychlostního obrábění, kde by se ve své podstatě obráběla tavenina. Stačí se dostat do oblasti, kde obráběný materiál díky teplotě začíná měnit své mechanické vlastnosti (tzn. ztrácí tvrdost a pevnost). Nejvhodnějším je aplikace této technologie při obrábění uhlíkové oceli, která se snadněji odpevňuje, horších výsledků už budeme dosahovat při obrábění slitinových ocelí a nejhorší situace nastává u superslitin, které jsou žárupevné a žáruvzdorné.

Vlastním způsobem tento proces lze chápat jako žíhání na měkko, kdy dochází ke snížení pevnosti, nebo lze chápat jako obrábění „ohřátého“ materiálu.

Z důvodu vyšších řezných rychlostí zpravidla 5x až 10x vyšších než je toho u konvenční technologie obrábění tyto rychlosti přináší pozitivní výsledky. Zvýšením řezné rychlosti se docílí od určité mezní teploty postupného změkčování obráběného materiálu, což vede ke značnému poklesu řezných sil. Díky tomu se zvyšuje životnost nástroje, zvýšení intenzity úběru třísek a zlepšení jakosti povrchu, případně i snížení teploty obrobku. [21]

Výhody HSC jsou především snížení nákladů na výrobu až o 50 %, lze obrábět s absencí procesních kapalin, což má za následek ekologické, ale i ekonomické výhody. Další výhodou je snížení tepelného zatížení nástroje a obrobku. Velkým přínosem technologie HSC je omezení nebezpečí chvění z důvodu přesunu řezných podmínek mimo rozsah kritických vibrací. [21]

Nevýhody této technologie jsou relativně vyšší pořizovací ceny obráběcích strojů a speciálních nástrojů, nutnost odborných znalostí obsluhy stroje, vysoké ceny za řídicí systémy (CAM systémy), nutnost vyvažovat rotační nástroje. [21]

Vybavení provozů pro obrábění technologií HSC, která mohou tvořit jak číslicové nebo konvenční obráběcí stroje, které by měly stroje splňovat jsou:

- rozsah otáček vřeten soustruhu 5 000 až 15 000 ot/min,
- rychloposuvy 90 až 120 m/min,
- vřetena o výkonech minimálně ( $P_c$ ) 15 až 60 kW,
- rozsah otáček pro frézovací vřeteno ( $n$ ) 20 000 až 80 000 ot/min,
- maximální rychlost pracovních posuvů od 10 do 40 m/min,
- zrychlení až 2G. [21]

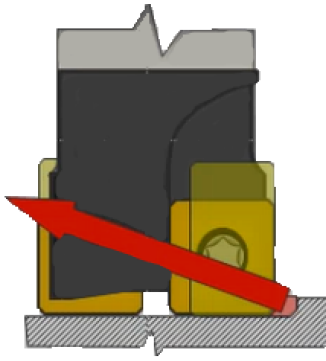
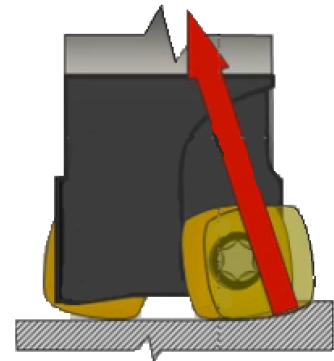
Limity HSC technologie jsou vlastnosti stroje a dále hlavně mez tepelné stability řezného materiálu (při zachování provozní spolehlivosti). Dále jsou zde kladeny daleko vyšší nároky na přesnost (vyváženost) nástroje. Rovněž musí být zaručena dostatečná tuhost upnutí, aby vlivem odstředivých sil nedošlo k uvolnění řezného segmentu.

### 3.2 Metoda HFC

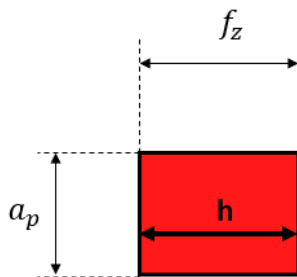
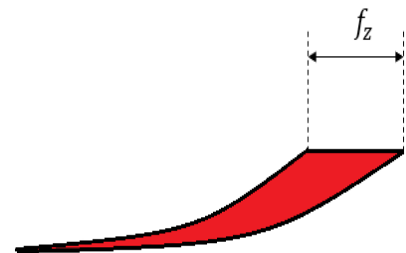
Hlavním předpokladem realizace frézování velkými posuvy je zvýšení schopnosti odvádět teplo od bříty do tělesa destičky, aniž by došlo ke zvýšení její teploty.

Zvýšení schopnosti bříty odvádět teplo se dosáhne především zvětšením aktivní délky bříty, tj. prodloužením délky zabírajícího ostří VBD.

Toto lze nejlépe dokumentovat na praktickém porovnání destiček s jiným úhlem nastavení. Kappa ( $\kappa_r$ ) 90° obrázek č. 13, proti HFC destičce (odpovídá úhlu nastavení 10-20°) obr. č. 14. Červeně vyznačené plochy (označující průřez třísky) jsou stejné, protože obě destičky odebírají stejnou hloubku řezu, stejným posuvem. Rozdíl je pouze v tloušťce třísky, kdy u destičky vlevo je odebíraná tříska relativně tlustá (rovna posuvu), kdežto vpravo je tříska daleko tenčí. Destička vpravo bude daleko lépe odvádět teplo, protože je v záběru daleko delší část bříty. Další výhodu můžeme spatřit i v orientaci výslednice sil. U nástroje s malým úhlem nastavení se výslednice řezných sil přiklání k ose vřetene což je samozřejmě žádoucí, protože v ose hlavního vřetene je předpokládána vždy nejvyšší tuhost stroje. [4]

Obrázek 13: VBD s  $\kappa r 90^\circ$  [4]

Obrázek 14: HFC destička [4]

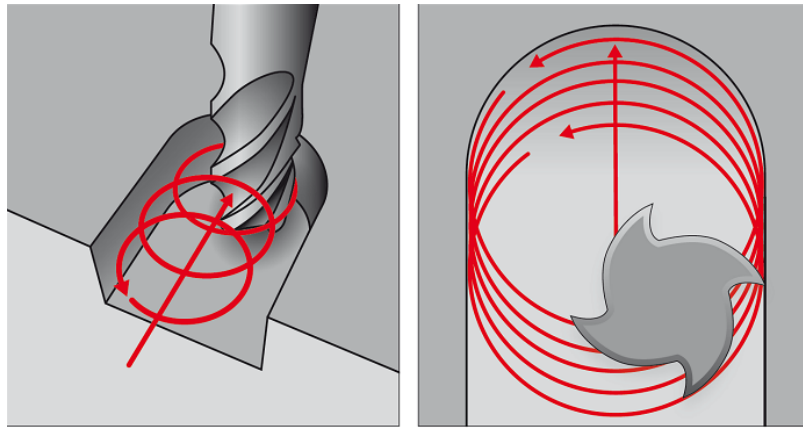
Obrázek 15: Záběrové podmínky  $\kappa r 90^\circ$ 

Obrázek 16: Záběrové podmínky HFC fréz

Limitujícími faktory této technologie jsou vedle vlastností nástroje i vlastnosti stroje. Proto je pro tuto technologii nutnost pořizovat stroje, které mají lehčené pojezdy, vyšší výkon, ale zároveň vyšší otáčky. Nejdůležitějším parametrem stroje je schopnost splňovat vysoké posuvové rychlosti, a to i při změně směru posuvu.

### 3.3 Metoda malého bočního úběru

Tato metoda ve svém principu vychází z obou dříve popsaných metod, resp. je jejich kombinací. Ve své podstatě se jedná o praktickou aplikaci technologie, kterou v r. 1930 odzkoušel pan Solomon. Díky malému úhlu záběru, tenké tříске a vysoké řezné rychlosti nedošlo k prohnutí nástroje a ani obrobku (většina tepla byla tedy odvedena třískou). Typicky je tato technologie využívána při tzv. TROCHOIDNÍM OBRÁBĚNÍ, které je možné definovat jako frézování pomocí kruhové interpolace se současným posouváním vpřed. Fréza opakovaně odebírá „tenké plátky“ materiálu, přičemž v radiálním směru neustále postupuje po spirálové dráze. [23]



Obrázek 17: Schéma metody bočního úběru [23]

Tento způsob obrábění byl vyvinut především pro hrubování a polodokončování tvrdých materiálů, které spadají do ISO H, ale je možné je dále použít i pro ostatní materiály, zvláště vhodné jsou pro ty, které jsou citlivé na vznik vibrací. [23]

Trochoidální frézování je velmi produktivní a bezpečné. Řezná rychlost ( $v_c$ ) je až 10x vyšší oproti standardním metodám. Obrovské využití tohoto způsobu obrábění bylo použito pro obrábění drážek a uzavřených dutin a vnějších kontur. Tato metoda využívá velké axiální a malé radiální hloubky řezu ( $a_e$ ), což způsobuje:

- V záběru je pouze jeden zub, díky tomu dochází ke snížení možnosti vzniku vibrací,
- snížení teploty v místě řezu, díky kratší době kontaktu, což umožňuje použití vyšších  $v_c$ ,
- radiální řezné síly jsou menší, umožňují menší nárok na stabilitu a umožňují zvýšení hloubek řezu  $a_p$ .

Výhodou trochoidálního frézování oproti klasické metodě frézování drážek je zvýšená spolehlivost obráběného procesu. Lze říct, že nástroj dosahuje vyšší životnosti, a navíc lze použít menší průměr nástroje např. frézu o  $\varnothing 12mm$ , je možné nahradit frézou o maximálním  $\varnothing 8mm$ , díky tomu se sníží náklady na pořízení nástroje. [23]

U metody malého bočního úběru při správně nastavených řezných podmínkách lze zvyšovat řeznou rychlost do nekonečna, aniž by se nástroj přehříval. Pro tuto technologii se používají zejména monolitní frézy. Limitujícím faktorem v tomto případě jsou opět vlastnosti nástroje (zejména ostrost a provozní spolehlivost břitu) dále jsme opět limitováni vlastnostmi stroje, může opět nastat problém s dosažením požadovaných posuvových rychlostí v nelineárních drahách. Rovněž programování je velmi obtížné. Nejmodernější

řídící systémy mají sice již integrovanou tuto technologii jako podprogram, ale v praxi se daleko častěji setkáváme s využitím CAMovských aplikací.

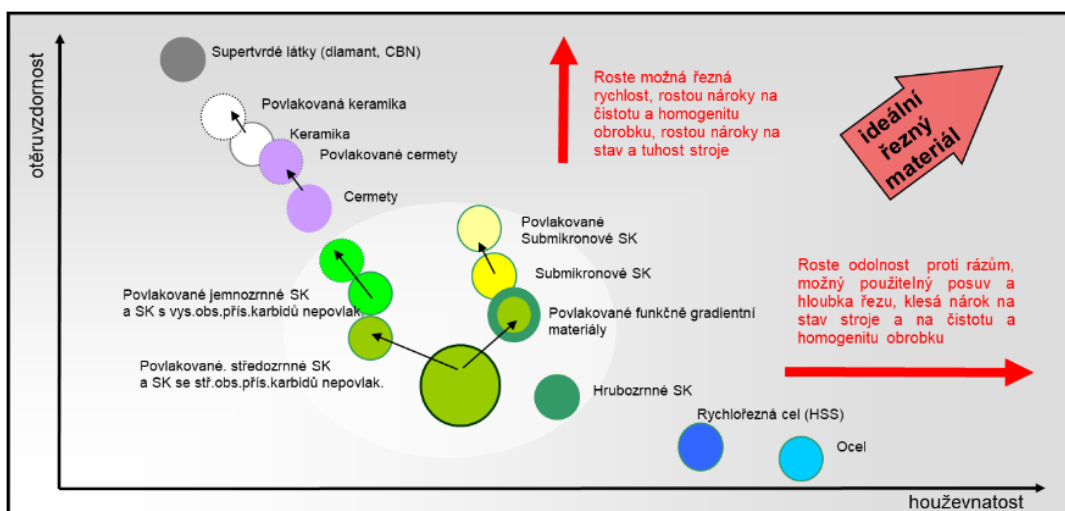
### 3.4 Konvenční technologie

V rámci této technologie je velmi důležité dodržovat jak řezné, tak záběrové podmínky doporučené výrobcem nástroje. S ohledem na možnosti by se měly volit podmínky tak, abychom minimalizovali jak silovou, tak tepelnou zátěž nástroje. Samozřejmě i zde velmi významnou roli hrají vlastnosti stroje. Je velký rozdíl, zda budeme obrábět na silovém či rychlostním stroji. Rovněž je pro nás limitující i výkon stroje a zejména pak tuhost celé soustavy.

U konvenční technologie obrábění, je podle mého soudu však nejdůležitějším kritériem mez tepelné stability řezného materiálu. Proto bych v následující kapitole rád pojednal o řezných materiálech používaných pro obrábění tvrdých materiálů.

#### ŘEZNÉ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ

Při volbě řezného materiálu bohužel musíme hledat kompromis mezi dvěma základními atributy a sice otěruvzdornost a houževnatost. Největší tvrdosti, a tedy otěruvzdornosti dosahují supertvrdé látky jako kubický nitrid bóru PCB a polykrystalický diamant PKD, ty jsou však velmi křehké, a naopak mají nejvyšší houževnatost, ale velmi nízkou otěruvzdornost vykazují nástrojové oceli. Pokud budeme hledat ideální řezný materiál, měl by mít, pokud možno co největší otěruvzdornost a současně i vysokou houževnatost, jak je patrné z následujícího obrázku: [4,15]



Obrázek 18: Závislost řezných materiálů otěruvzdornost X houževnatost [4]



V následujících částech bych se rád trochu pozastavil u jednotlivých druhů řezných materiálů, přičemž největší pozornost si dovolím věnovat slinutým karbidům, které jsou dominantním výrobním artiklem zadavatele této práce.

- **CBN**

CBN neboli kubický nitrid bóru je materiál, který se volně v přírodě nevyskytuje. Jedná se o velice tvrdý řezný materiál s velmi tvrdou strukturou podobně jako diamant. Hodnota tvrdosti, kterou dokáže nabídnout je přibližně 4000 až 5500HV, tato tvrdost je mnohem větší, než jaké dosahují běžné karbidy kovů. S výrobou CBN je spojena vysoká teplota a velké tlaky, při kterých dochází ke sloučení kubické krystaly bóru s kovovým nebo keramickým pojivem. [15]

Ve srovnání s diamantem má kubický nitrid bóru velkou výhodu, a to stabilitu při vysoké teplotě. Obrábění kalených ocelí o tvrdosti 60 až 68 HRC, lze bez problému obrábět rychlostí ( $v_c$ ) 45 až 60 m/min s posuvem ( $f_n$ ) 0,2 až 0,4mm na otáčku. Takto obrobené plochy není potřeba dále dokončovat (přebušovat).[18]

Novodobé CBN jsou keramické kompozity obsahující 40 až 65% CBN. CBN je obvykle náchylný na opotřebení chemickým otěrem, ale díky keramickému pojivu získává odolnost vůči otěru. Druhou skupinou je třída se zvýšeným obsahem CBN a to 85 až 100%. Tato skupina může používat kovové pojivo pro zvýšení houževnatosti. VBD pak tvoří hrot vyrobený z kubického nitridu bóru, který je připájený na nosič ze slinutého karbidu. [19]

- **Řezná keramika**

Historii řezné keramiky si můžeme představit už v době kamenné i mnohem později, kdy jako první „keramický nástroj“ používal člověk pískovec, který obsahoval značné množství břitů  $\text{SiO}_2$  mikroskopických rozměrů. Později se pískovec používal pro broušení nožů, nůžek apod. a byl tak hlavním brousícím materiálem, než jej později nahradily modernější materiály např.  $\text{SiC}$ . [15]

Řezná keramika obecně patří do anorganických sloučenin nekovového charakteru. Jsou to velmi tvrdé materiály s vysokou tvrdostí za tepla, při obrábění chemicky nereagují s obráběným materiálem. Keramika je vhodná pro obrábění tvrdých materiálů odolává teplotám až 1200°C na břitu. VBD z tohoto materiálu bývají (v závislosti na obráběném materiálu) používány při řezných rychlostech v rozsahu 100 – 1600 m·min<sup>-1</sup>. Keramika jako nástrojový materiál se vyznačuje nízkou tepelnou vodivostí a vysokou křehkostí.

Nástroje s VBD, které jsou vyrobené z řezné keramiky je vhodné používat u velkosériové výroby případně hromadné výroby nebo tam, kde nejsme limitováni technologickými omezeními a chceme dosáhnout zvýšení efektivity. [15;18]

Nejčastěji se tyto řezné materiály používají pro obrábění:

- Kalené oceli a povrchově kalených obrobků,
- šedé a tvrzené litiny,
- žáropevných slitin.

- **Cermety**

V historii vznikl název Cermet sloučením dvou slov a jejich prvních tří hlásek. Sloučily se slova keramika (ceramics) a kov (metal), proto vznikl název CER+MET= Cermet. Jejich složený název by měl představovat materiál, jehož mechanické vlastnosti se vyznačují kombinací tvrdosti keramiky a houževnatosti kovu. [15]

Cermety jsou jedním z materiálů pro výrobu VBD. U těchto řezných materiálů byl karbid wolframu (WC) nahrazen TiC, TiN, TiCN s niklovým pojivem, případně Ni/Co pojivem a dnes nejmodernějším Ni+Co+Mo pojivem. Vlastnosti cermetů jsou závislé na obsahu jednotlivých přídavných složek. Cermety vynikají odolností vůči difuznímu oxidačnímu opotřebením, chemickou stabilitou, odolností proti tvorbě nárůstku a vynikají dobrou tvrdostí za tepla. Další výhodou je nízká měrná hmotnost, která se u cermetu pohybuje kolem 5,6 až 7,4g/cm<sup>3</sup>. Vyrábí se pomocí slisování a spékání kovové směsi s přídavkem keramického prášku. [15;18]

- **Slinuté karbidy (SK)**

Jedná se o produkt vyrobený pomocí práškové metalurgie. SK jsou složeny z karbidů a kovového pojiva nejčastěji kobalt Co. Hlavními prvky obsažené u SK jsou karbidy wolframu (WC), titanu (TiC), niobu (NbC) a tantalu (TaC). Vyrábí se mnoho normalizovaných tvarů a velikostí, lišící se způsobem upnutí. Nejčastěji se však používá mechanické upnutí destičky k řezné části nástroje. Tyto destičky mají několik ostří a při otupení všech ostří se destička vyřazuje. [14]

Rozdělují se na slinuté karbidy povlakované a nepovlakované. V dnešní době jsou nepovlakované destičky omezeny pouze na aplikaci, kde je dosahováno nízkých řezných rychlostí a tím pádem nižších řezných teplot. Dále se používají na operace, kde by mohlo

dojít k chemické afinitě mezi povlakovanou vrstvou a obráběným materiálem (např. obrábění titanu).

### Vlastnosti substrátu H (WC-Co):

U tohoto typu slinutého karbidu jsou vlastnosti závislé na konečném složení a strukture. I malé odchylky od dokonalého poměru obsahu uhlíku mají za následek tvorbu grafitu nebo ternární sloučeniny. Tyto fáze jsou většinou nežádoucí a způsobují snížení řezného výkonu a zhoršení mechanických vlastností. Při výrobě sloučeniny s ideálními vlastnostmi musí být uhlík (C) udržován v malém množství. Pro stabilizaci struktury se přidává minimální množství TaNbC nebo CrC. Vlastnosti SK v závislosti na složení WC-Co je znázorněno v následující tabulce č.4. [15]

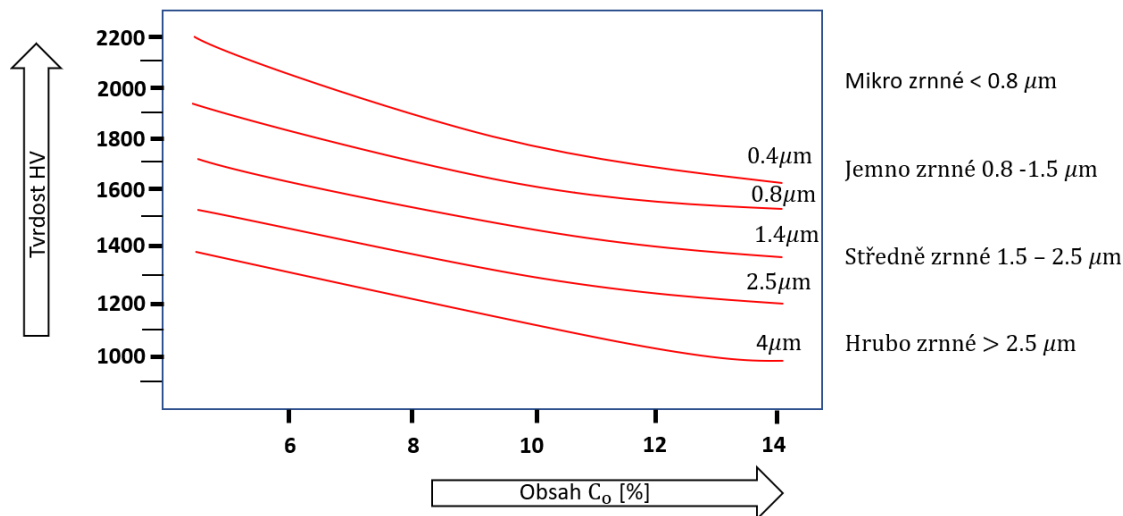
Složení [hm. %]		Měrná hmotnost [g cm <sup>-3</sup> ]	Tvrdość		Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Měrná tepelná vodivost [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Součinitel délkové roztažnosti [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	Měrný odpor [μΩ.cm]
WC	Co		[HRA]	[HV]						
100	-	15,7	92 ÷ 94	1800 ÷ 2000	300 ÷ 500	3000	722	122	5,7 ÷ 7,2	53
97	3	15,1 ÷ 15,2	90 ÷ 93	1600 ÷ 1700	1000 ÷ 1200	5900	670	88		
95,5	4,5	15,0 ÷ 15,1	90 ÷ 92	1550 ÷ 1650	1200 ÷ 1400	5800	640	84	3,4 (0 ÷ 300 °C) 4,1 (300 ÷ 600 °C)	-
94 ÷ 94,5 <sup>1)</sup>	5,5 ÷ 6	14,8 ÷ 15,0	90 ÷ 91	1500 ÷ 1600	1600 ÷ 1800	5000	620	80	3,6 (0 ÷ 300 °C) 4,6 (300 ÷ 500 °C)	20
94 ÷ 94,5 <sup>2)</sup>	5,5 ÷ 6	14,8 ÷ 15,0	91 ÷ 92	1600 ÷ 1700	1400 ÷ 1600	5500	630 <sup>3)</sup>	80	5	21
91	9	14,5 ÷ 14,7	89 ÷ 91	1400 ÷ 1500	1500 ÷ 1900	4800	590	75	-	-
90	10	14,3 ÷ 14,5	88,5 ÷ 90,5	1350 ÷ 1450	1550 ÷ 1950	4700	585	71	-	-
89	11	14,0 ÷ 14,3	88 ÷ 90	1300 ÷ 1400	1600 ÷ 2000	4600	580	67	3,8 (0 ÷ 300 °C) 4,8 (300 ÷ 600 °C)	18
87	13	14,0 ÷ 14,2	87 ÷ 89	1250 ÷ 1350	1700 ÷ 2100	4500	560	59	-	-
85	15	13,8 ÷ 14,0	86 ÷ 88	1150 ÷ 1250	1800 ÷ 2200	3900	540	-	6	-
80	20	13,1 ÷ 13,3	83 ÷ 86	1050 ÷ 1150	2000 ÷ 2600 <sup>3)</sup>	3400	500	-	4,7 (0 ÷ 300 °C) 6,2 (300 ÷ 600 °C)	-
75	25	12,8 ÷ 13,0	82 ÷ 84	900 ÷ 1000	2000 ÷ 2800 <sup>3)</sup>	3200	470	-	5,0 (0 ÷ 300 °C) 6,7 (300 ÷ 600 °C)	-
70	30	12,3 ÷ 12,5	80 ÷ 82	850 ÷ 950	1800 ÷ 3000 <sup>3)</sup>	3000	440	-	-	-
-	100	8,7	-	125 ÷ 250	700 ÷ 1000		180	71	5,1	14

Pozn: 1) hrubozrnná fáze WC, 2 ÷ 4 μm; 2) jemnozrnná fáze WC, 0,5 ÷ 2 μm; 3) výrazně závisí na velikosti zrna a obsahu uhlíku; 4) střední hodnoty

Tabulka 4: Složení a vlastnosti slinutých karbidů WC – Co [15]

### Zrnitost substrátu

Čím jemnější je struktura slinutého karbidu, tím je větší jeho tvrdost viz obr.č.19.



Obrázek 19: Závislost velikosti zrna na tvrdosti [4]

### Povlakování

#### Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování plynné fáze)

Jedná se o metodu, která tvoří povlak na základě chemických plynných reakcí probíhající v plazmě. Plazma se vytváří v blízkosti povrchu nástroje, kde následuje usazení heterogenních částic na povrchu substrátu (podkladového SK). Výchozí aktivní plyny musí obsahovat prachovou sloučeninu, která se vlivem působení přivedené energie rozpadá. Pro vytvoření požadované chemické reakce je zapotřebí nekovový reaktivní plyn (např. N<sub>2</sub>). Dále je zapotřebí nosný plyn, který zaručí dopravu dané směsi až k povlakovanému předmětu. [15]

Pro metodu CVD je typická pracovní teplota kolem 1000°C a schopnost nanášet tlustších vrstev.

Výhodami CVD povlaků jsou např.[15]:

- skvělá adheze k podkladovému materiálu,
- povlakování předmětů ze všech stran,
- dobrá homogenita povlaku,
- vysoká hustota povlaku,
- ekonomická výhodnost silnějších vrstev povlaku.

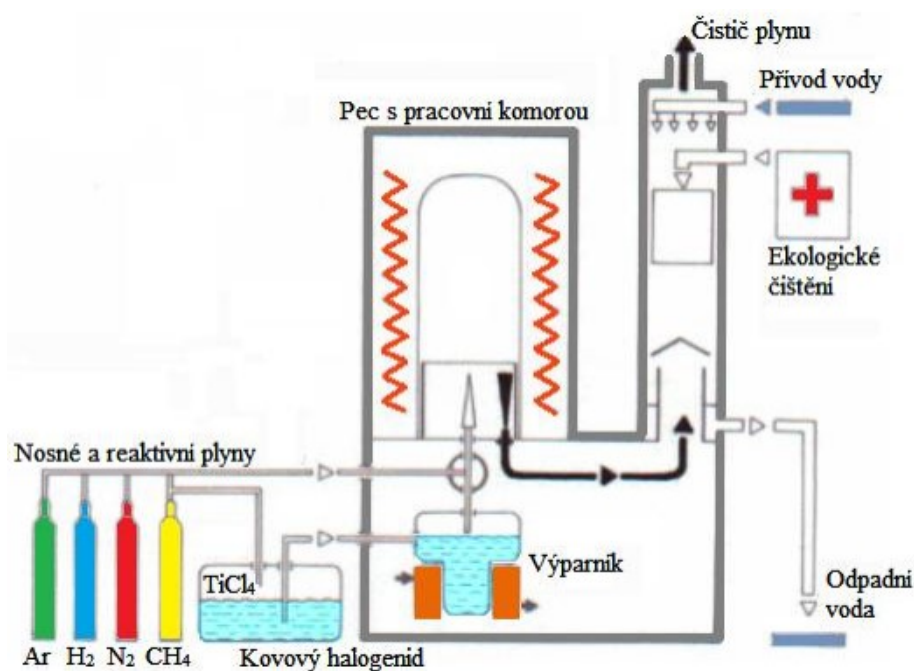
Nevýhody CVD povlaků jsou např.[15]:

- tahové napětí obsažené ve vrstvách povlaku,
- vysoké pracovní teploty oproti metodě PVD,
- nelze povlakovat ostré hrany nástroje,
- zdlouhavý pracovní cyklus.

Chemické složení CVD povlaků [4]:

- TiC (Titankarbid) – jedná se o povlak, který dosahuje nejvyšší tvrdosti přibližně až 3200HV. Tyto povlaky se vyznačují vysokou odolností proti otěru hřbetu, ale zároveň mají nižší odolnost proti vymílání čela a oxidaci.
- TiN (Titannitrid) – oproti TiC dosahuje nižší tvrdosti a to na 2100HV. Díky nižší tvrdosti má horší odolnost proti otěru hřbetu, ale zároveň má vyšší odolnosti proti vymílání čela.
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Aluminiumoxyd) – tento typ povlaku se vyznačuje tvrdostí kolem 2300HV, vyšší tvrdostí za tepla a chemickou odolností.
- ALON (Aluminiumoxydnitrid) – je povlak, který je součástí vícevrstevných povlaků. Povlak odolává opotřebení hřbetu a čela.
- TiCN (Titancarbonnitrid) – povlak dobře odolává otěru hřbetu i vymílání čela.

**Schéma metody CVD:**



Obrázek 20: Schéma metody CVD [16]

**Metoda PVD ( Physical Vapour Deposition) – fyzikální napařování**

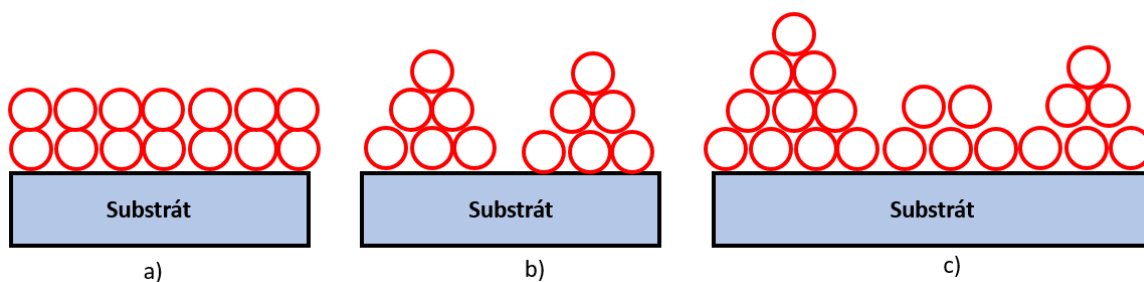
Povlaky tohoto typu jsou vytvářeny za pomoci kondenzace částic oddělených ze zdroje částic (terče, targety). Reakce probíhají za sníženého tlaku přibližně od 0,1 do 1 Pa v povlakovací peci při teplotách nižších než 500°C. Uvolněné ionizované částice reagují s atmosférou vakuové komory, kterou tvoří inertní a reaktivní plyny (nejčastěji Ar a N<sub>2</sub>). Původně metoda PVD sloužila pro povlakování nástrojů z RO (rychlořezné oceli), ale v dnešní době je trend povlakovat nástroje ze slinutých karbidů. Částice se usazují na nástroj metodami napařování a napařování. [15]

Napařování – jev, kdy dochází k nanesení částic oddělených z povrchu zdroje (terče) fyzikálním odprašovacím procesem. Tento proces probíhá ve vakuu při nižším tlaku než 0,7 Pa. Protože se vše děje za nízkých tlaků, tak se odprášené částice na povrch substrátu dostanou bez kolize s plynem, při pohybu od zdroje k substrátu. Tuto metodu je možné aplikovat i při zvýšeném tlaku(P) přibližně od 0,7 do 2 Pa. V důsledku zvýšení tlaku se odprášené částice zahřívají z důvodu srážek s molekuly plynu než se dopraví na povrch substrátu. [15]

Napařování – je proces povlakování, při kterém předehřátý terč odpařuje materiál, který následně kondenzuje na substrát. Napařování probíhá opět ve vakuu, ale při ještě nižším tlaku přibližně 10<sup>-3</sup> až 10<sup>-8</sup> Pa. Při tak nízkém tlaku je dráha mezi substrátem a terčem velmi velká, což má za následek, že se odpařené atomy před kondenzací pohybují po nekolizních drahách což způsobí, že se povlak vytváří nerovnoměrně. [15]

**Metody kladení vrstev PVD schéma podle [15]:**

- a) Frank, Van der Merwe (Vrstvený růst)
- b) Volmer, Weber (Ostrůvkový růst)
- c) Stranski, Krastanov (Kombinovaný růst)



Obrázek 21: Schéma způsobu kladení vrstev [15]

Destičky povlakované metodou PVD mají nízké zaoblení řezné hrany z důvodu tenké vrstvy povlaku do  $5\mu\text{m}$ . Nejčastěji se používají pro frézování z důvodu odolnosti vůči rázům, a to jak silovým, tak hlavně teplotním (jsou více houževnaté), díky nižším teplotám při výrobě základní substrát není tak křehký jako u metody CVD.

#### Požadavky na nástroje ze SK

Požadavkem na materiál řezných nástrojů ze slinutých karbidů je použití materiálu s vysokou mezí tepelné stability. Toho dosáhneme použitím nízko-kobaltového substrátu typu H (WC + Co), který je vhodný pro použití při vysokých teplotách. Dále použitím submikronového substrátu s jeho zrnitostí menší než  $1\mu\text{m}$ . Substrát typu H je houževnatější při stejném obsahu kobaltu než typ S [WC+(TiC, TaC, NbC)+Co].

Dalším požadavkem je dodržet vysokou pevnost břitu, čehož se dá dosáhnout negativnější geometrií.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentu se zabývám porovnáním dvou generací VBD od firmy Dormer–Pramet. Jedná se o porovnání trvanlivosti staré a nové generace kruhové destičky RDHX1003MOT při stejných řezných podmínkách. Destičky byly povlakovány metodou PVD typem TiAlN (multi).

Při testu byly použity pro obě destičky stejné řezné podmínky viz tabulka 5.:

Řezné podmínky	Průměr frézy	$D_{\text{ef}}=19,8$ [mm]	Počet VBD ve fréze	2 ks
Řezná rychlost	$v_c = 110\text{ m/min}$		Počet záběrů	40x
Otáčky vřetene	$n = 1773\text{ ot/min}$		Obráběná délka	100 [mm]
Posuv	$f_z = 0,20\text{ mm/zub}$		Povrchová kůra	NE
Posuv	$f_{\text{min}} = 709\text{ mm/min}$		Přerušovaný řez	NE
Axiální hloubka řezu	$a_p = 1\text{ mm}$		Chladicí kapalina	Stl. vzduch
Radiální hloubky řezu	$a_e = 15\text{ mm}$		Čas jednoho záběru	5,6 [min]

Tabulka 5: Řezné podmínky při testování VBD





## 4.1 Vertikální obráběcí centrum MCV 1270 Power



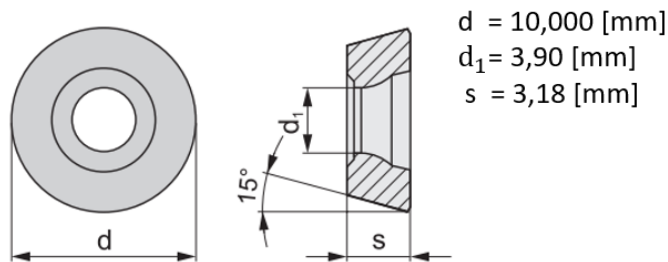
Obrázek 23: MCV 1270 Power [24]

### 4.1.1 Technické parametry stroje

- Pracovní rozsah: X/Y/Z – 1270/610/720 [mm].
- Upínací plocha stolu: 1500 x 670 [mm].
- Vzdálenost čela vřetena od upínací plochy stolu: 120-840 [mm].
- Maximální zatížení stolu: 1200 [Kg].
- Max. otáčky vřetene: 8000 [ot/min].
- Kuželová dutina vřetena ISO 50.
- Počet míst v zásobníku: 24.
- Maximální průměr nástroje: 125 [mm].
- Pracovní posuv X, Y, Z: 1 - 40 000 [mm/min].
- Výkon motoru vřetena Siemens: 28 [kW].
- Kroutící moment: 406 [Nm]. [24]

## 4.2 Popis testovaných materiálu VBD

RDHX1003MOT



Obrázek 24: Rozměry testovaných VBD

### 4.2.1 Materiál 7205

Jedná se o materiál s ultrasubmikronovým substrátem bez kubických karbidů a zároveň obsahuje velmi málo kobaltu. Tento materiál je povlakován metodou PVD nového typu. Díky němu odolává oxidaci a získává unikátní kluzné vlastnosti. Materiál 7205 je velmi dobře odolný proti mechanickému opotřebení. Vyžaduje stabilní záběrové podmínky a lze jej používat při vysokých rychlostech a zároveň při nižších i středních průřezech třísky. Využití u všech skupin obráběných materiálu až na superslitiny (skupiny S). [4]



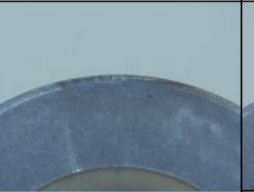
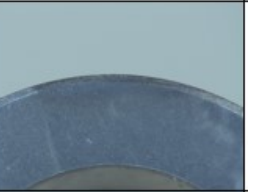




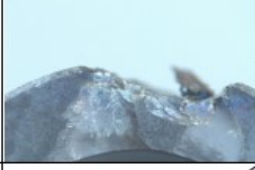

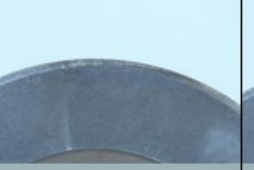

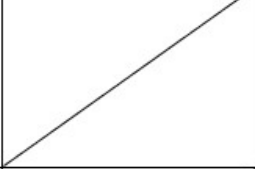
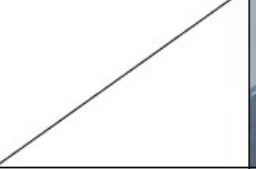
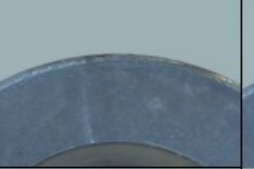
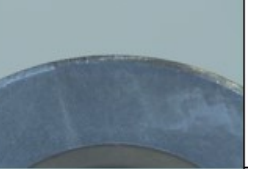
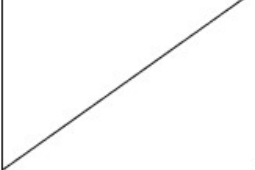







### 4.2.2 Materiál M4303

Jedná se rovněž o ultrasubmikronový substrát typu H (WC+Co) s velmi nízkým obsahem Co. Substrát se před nanesením předběžně upraví procesem zvaným tryskání za mokra, který odstraňuje nečistoty a čistí povrch, aby se maximalizovala adheze mezi povlakem a substrátem a získal se nižší koeficient tření. [4]

Povlak nanesený PVD technologií je tvořen vrstvou TiN, která působí jako můstek mezi substrátem a ultratenkou vrstvou AlTiN ( $1,5$  až  $3\mu\text{m}$ ). AlTiN je tvrdší variantou TiAlN, která současně nabízí vyšší odolnost proti difuzi a oxidaci. [4]









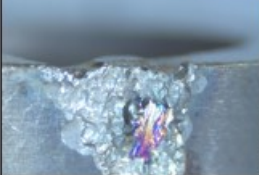



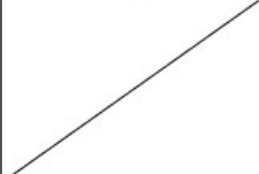
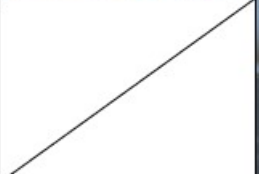


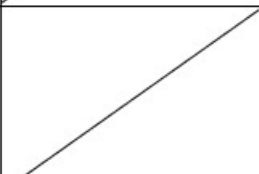
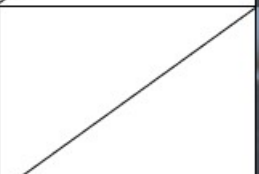


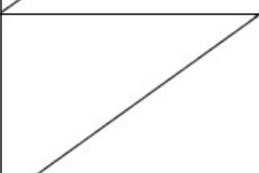
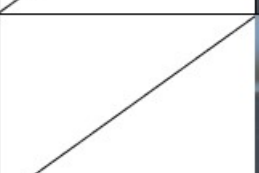
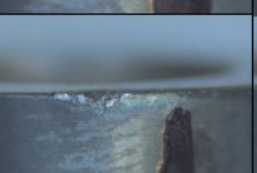

Tento řezný materiál vyniká zejména v tzv. suchých aplikacích při obrábění velmi tvrdých a abrazivních materiálů. Proto je doporučován jako nejlepší volba pro frézování materiálů skupiny H a K. [4]

### 4.3 Průběh opotřebení na čele destiček při zkoušce na trvanlivost

Výrobce	DormerPramet	DormerPramet	DormerPramet	DormerPramet
Označení	RDHX1003; 7205	RDHX1003; 7205	RDHX1003; M4303	RDHX1003; M4303
Vzorek	A1	A6	B3	B8
5,6 [min]				
11,2 [min]				
16,8 [min]				
28 [min]				
39,2 [min]				
50,4 [min]				

Obrázek 25: Testované VBD – snímky z čela

#### 4.4 Průběh opotřebení na hřbetu destiček při zkoušce na trvanlivost

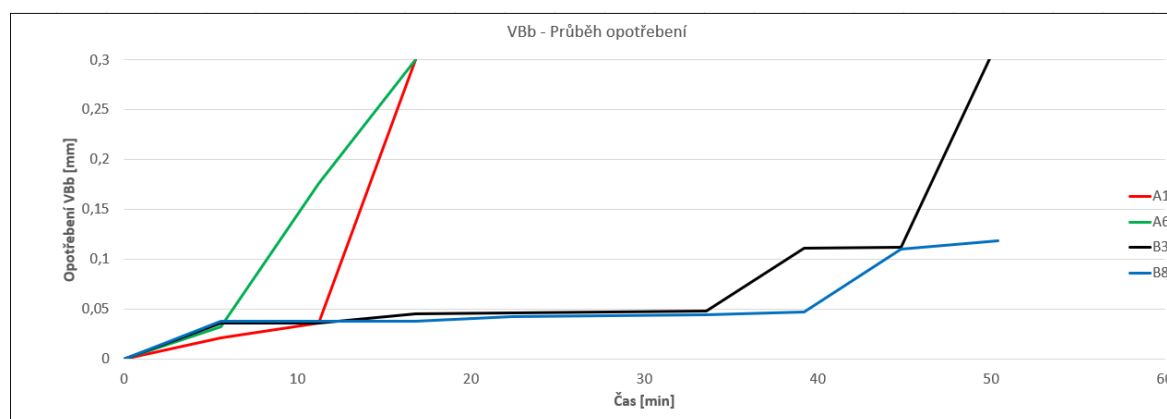
Výrobce	DormerPramet	DormerPramet	DormerPramet	DormerPramet
Označení	RDHX1003; 7205	RDHX1003; 7205	RDHX1003; M4303	RDHX1003; M4303
Vzorek	A1	A6	B3	B8
5,6 [min]				
11,2 [min]				
16,8 [min]				
28 [min]				
39,2 [min]				
50,4 [min]				

Obrázek 26: Testované VBD – snímky hřbetu

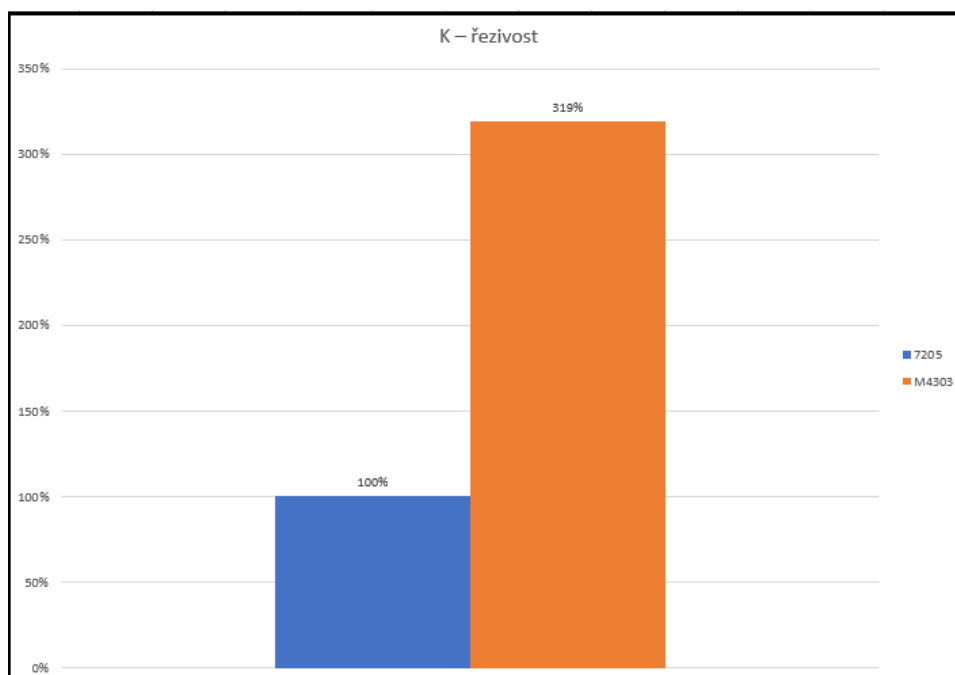
## 4.5 Záznam o opotřebení hřbetu nástroje

Výrobce	Označení VBD	Vzorek	Kritérium $VB_b$ [mm]	Trvanlivost T [min]								
				5,6	11,2	16,8	22,4	28	33,6	39,2	44,8	50,4
DormerPramet	RDHX1003MOT; 7205	A1	$VB_b$	0,021	0,036	0,3						
		A6	$VB_b$	0,032	0,176	0,3						
DormerPramet	RDHX1003MOT; M4303	B3	$VB_b$	0,036	0,036	0,045	0,046	0,047	0,048	0,111	0,112	0,319
		B8	$VB_b$	0,038	0,038	0,038	0,042	0,043	0,044	0,047	0,11	0,118

Tabulka 6: Záznam opotřebení hřbetu VBD v závislosti na čase



Obrázek 27: Průběh opotřebení hřbetu – graf

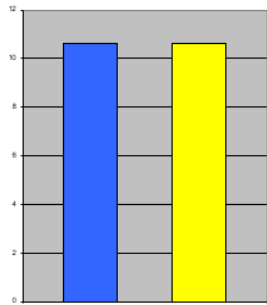

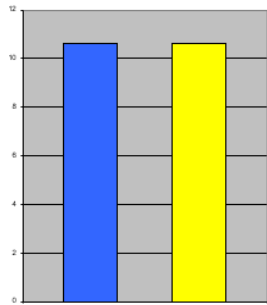




Obrázek 28: Rozdíl životnosti

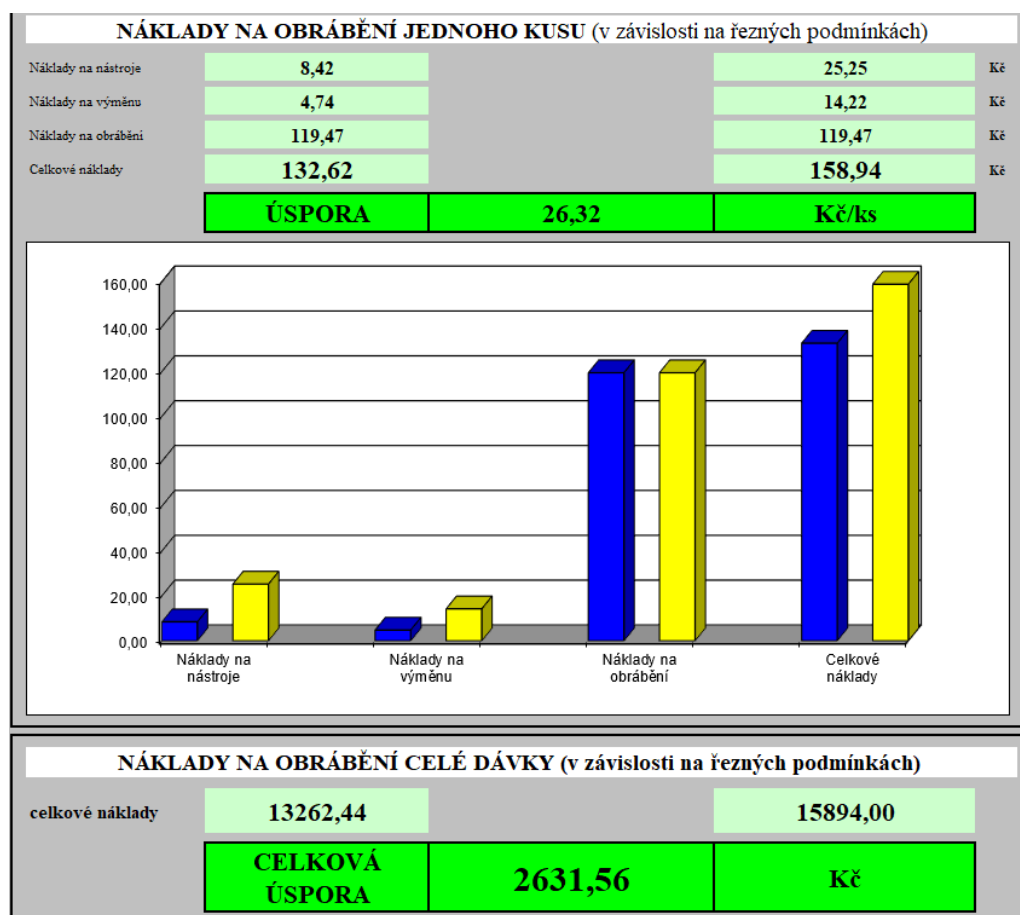
## 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Po technické stránce tento experiment potvrdil trendy, které se ukazují v oblasti nástrojů, které obrábějí tvrdé materiály. Projevil se velice příznivý vliv jemnější struktury, i když se u obou případů jednalo o submikronové materiály, tak starý materiál měl střední zrnitost  $0,5\mu\text{m}$  a nový  $0,4\mu\text{m}$ . Tímto se potvrdil trend zjemňování substrátu. Tento výsledek byl umocněn příznivými vlastnostmi povlaku, který má vyšší mez tepelné stability a vyšší tvrdost při menší tloušťce. Pro znázornění lze porovnat vzorky A6 a B8, kdy se v 11,2 minutě u vzorku A6 projevilo mikro-vyštipnutí řezné hrany a u vzorku B8 nikoliv. Což opět potvrzuje, že jemnější materiál vykazuje vyšší pevnost řezné hrany a lze lépe tvarovat řeznou hranu.

Testované destičky bych dále porovnal po ekonomické stránce, kdy ceny testovaných destiček jsou stejné tedy 223Kč/ks. Hodinová sazba stroje činí 1280Kč/hod, kdy cena nástroje dle ceníku firmy Dormer–Pramet je 2840Kč. Při výpočtu je nutné brát v úvahu i řezné podmínky, které byly pro obě destičky stejné, včetně počtu řezných hran, kterých je 6. Podrobnější přehled dosažených hodnot je v následující tabulce č. 7.

stroj	MCV 1270 Power		technik	Hojgr	
hodinová sazba stroje	1280,00		Kč/h		
součást	112-1701361		-	obráběný materiál	19 552
velikost dávky (počet kusů)	100		ks	tvrdost materiálu	53 HRC
PRAMET– NOVÁ				PRAMET	
nástroj	25E2R032M12-SRD10			25E2R032M12-SRD10	-
cena nástroje	2840			2840	Kč
počet VBD v nástroji	2			2	ks
VBD	RDHX 10			RDHX 10	-
materiál VBD	M4303			7205	-
geometrie	T			T	-
cena VBD	223			223	Kč
počet řezných hran (vroubitových hřítů)	6			6	ks
čas výměny nástroje (VBD)	1,00			1,00	min
	reálně (aplikované) odzkoušené hodnoty	objem materiálu odebraný za jednu minutu		reálně aplikované hodnoty (původní nasazení)	
	průměr frézy	19,8		19,8	m/min
	počet otáček vřetene	1773		1773	ot/min
	řezná rychlost	110		110	m/min
	posuv	0,20		0,20	mm/zub
	posuv	709		709	mm/min
	hloubka řezu	1		1	mm
	šířka záběru	15		15	mm
	trvanlivost břitů	9		3	ks
	trvanlivost břitů	50,4		16,8	min
	strojní čas (čas obrábění 1ks)	5,60		5,60	min
	objem materiálu odebraný za jednu minutu	11		11	ccm
 PRAMET-NOVÁ		 PRAMET			

Tabulka 7: Hodnoty pro tech.-ekonomické zhodnocení



Obrázek 29: Ekonomické zhodnocení

Z výpočtu je patrné, že nová generace materiálu (M4303) je podstatně výkonnější a jeho aplikací, lze získat značné úspory. Pro ilustraci byla do výpočtu zařazena série 100ks.

Při této režijní sazbě by minimum nákladové křivky mělo být okolo 30 minut. Z toho vyplývá, že při trvanlivosti 50 minut, lze zvýšit řezné podmínky a tím by rozdíl mezi starým a novým materiálem byl daleko větší.

## 6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat trvanlivost dvou generací řezných materiálů ze slinutých karbidů na stroji MCV 1270 Power. Nástroj byl osazen dvěma destičkami RDHX1003MOT staré generace řezných materiálů 7205 (vzorky A1, A6) a nové generace M4303 (vzorky B3, B6). Od každé generace sloužila první destička jako vzorek a druhá sloužila jako pomocná. V průběhu zkoušky se měřilo i jejich opotřebení.

Testování bylo provedeno na stejném obráběném materiálu, a to nástrojové oceli ČSN 19 552. Při zkoušení destiček jsem dosáhl pozitivních výsledků, kdy se nový materiál M4303 prokázal jako mnohem výkonnější, co se týče životnosti i provozní spolehlivosti, kdy jeho trvanlivost byla 50,4 minut. U vzorku B3, B8 se projevila narušená hrana, která se následně vyštípnula. Starší generace dosáhla trvanlivosti 16,8 minut a skončila destrukcí u obou vzorků (A1, A6).

Nová generace řezného materiálu prokázala při těchto řezných podmínkách a obrábění výše specifikovaného obráběného materiálu téměř trojnásobnou životnost oproti starší generaci. Díky vyšší trvanlivosti a vyšší životnosti se projevíly značné finanční úspory, což je patrné z ekonomického zhodnocení. Úspora na obrábění jednoho kusu v tomto případě činí až 26Kč.



**Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat firmě Dormer–Pramet s. r. o., za spolupráci při vypracování mé bakalářské práce, především velký dík patří panu Ing. Romanu Maršíčkovi za jeho trpělivost, velkou ochotu a vstřícnost při společných konzultacích.

Dále bych rád velmi poděkoval panu doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. za jeho odborné vedení, užitečné rady a připomínky k vypracování bakalářské práce.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DormerPramet.com. *DormerPramet.com [online]*. [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cs-cz/company/our-company?country=cz>
- [2] SALAJKA, J. Slinuté karbidy a jejich efektivní využití. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 110s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [3] Umi.fs.cvut.cz [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wpcontent/uploads/2014/10/01\\_pm\\_vyskopevne\\_a\\_vysokolegované\\_oceli\\_a\\_slitiny\\_ni\\_a\\_co.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wpcontent/uploads/2014/10/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegované_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf)
- [4] autor: Ing. Roman Maršíček: *Interní školící materiály společnosti Dormer–Pramet s. r. o.*
- [5] Oneindustry.one: *zušlechťování* [online]. [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.one/lexikon/zuslechtovani/>
- [6] Oneindustry.one: *kalení* [online]. [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.one/lexikon/kaleni/>
- [7] Ferona online [online]. [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-oceli/>
- [8] *Typy třísek* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://www.broxtec.cz/page/67984.typy-trisek-typ-dopravniku/>
- [9] Sme.org: *Advanced Cutting Tools* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.sme.org/technologies/articles/2018/november/advanced-cutting-tools-rev-up-milling-operations/>
- [10] *Oblasti deformací třísky* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: [https://www.moodletrebesin.cz/pluginfile.php/9860/mod\\_resource/content/0/5.%20PR%C3%81CE%20A%20S%C3%8DLA%20P%C5%98I%20OBR%C3%81B%C4%9AN%C3%8D.pdf](https://www.moodletrebesin.cz/pluginfile.php/9860/mod_resource/content/0/5.%20PR%C3%81CE%20A%20S%C3%8DLA%20P%C5%98I%20OBR%C3%81B%C4%9AN%C3%8D.pdf)
- [11] *Technologie II* [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_1dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf)
- [12] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II*. 1. díl, Fyzikálně mechanické zákonitosti procesu obrábění. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-228-5.
- [13] BAKŠA, Tomáš. *Trvanlivost řezných nástrojů při obrábění velmi tvrdých a pevných materiálů*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. ZČU - FST - KTO. Vedoucí práce Ing. Miroslav ZETEK PhD.
- [14] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.

- [15] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [16] KANTAR, F. PVD povlaky nové generace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš.
- [17] *Katalog.mav.cz: destička ZDEW 120408* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://katalog.mav.cz/detail.php?id=92463&lang=0&mena=2>
- [18] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [19] *Forum.strojirenstvi* [online]. [cit.2020-03-10]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/download/file.php?id=68049>
- [20] LÁNIK, M. Energetické a ekologické aspekty HSC obrábění. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2011. 83s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.
- [21] SADÍLEK, Marek. *Obrábění I: výběr přednášek*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3857-1.
- [22] *Sandvik.coromant: Trochoidální obrábění* [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx>
- [23] *Nastrojarna.oneindustry.one: Trochoidní frézování* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://nastrojarna.oneindustry.one/proc-pouzivat-strategii-trochoidniho-frezovani/>
- [24] *Kovosvit.cz: MAS MVC 1270 power* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-1270-p9.html#technicaldata>
- [25] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York: Oxford University Press, 2005. 651.p ISBN 0–19–514206–3.
- [26] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Přeložil Miroslav KUDELA. Praha: Scientia, 1997.
- [27] *Toolsteel.cz: Chemické složení oceli* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-2343-x37crmo5-1-x38crmov5-1-19552/>

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Diagram kalící teploty pro Fe– Fe <sub>3</sub> C.....	14
Obrázek 2: Model třísky – šedá litina [4] .....	17
Obrázek 3: Model plasticky deformované třísky [4] .....	18
Obrázek 4: Síly – tvrdé materiály [4]                      Obrázek 5: Síly – měkká ocel [4].....	19
Obrázek 6: Schéma prostupu tepla [4] .....	21
Obrázek 7: Distribuce tepla v materiálech tvořící plasticky deformovanou třísku.....	23
Obrázek 8: Distribuce tepla v materiálech tvořící třísku bez plastické deformace. ....	23
Obrázek 9: Příklad rozdělení teplot [4] .....	24
Obrázek 10: Schéma rozdělení tepla mezi třísku – nástroj – obrobek [4,20].....	24
Obrázek 11: Předpokládaná závislost teploty řezání na řezné rychlosti [4] .....	26
Obrázek 12: Graf závislosti řezné rychlosti na teplotě [20] .....	27
Obrázek 13: VBD s kr 90° [4]                      Obrázek 14: HFC destička [4].....	29
Obrázek 15: Záběrové podmínky kr 90°    Obrázek 16: Záběrové podmínky HFC fréz...	29
Obrázek 17: Schéma metody bočního úběru [23] .....	30
Obrázek 18: Závislost řezných materiálů otěruvzdornost X houževnatost [4] .....	31
Obrázek 19: Závislost velikosti zrna na tvrdosti [4] .....	35
Obrázek 20: Schéma metody CVD [16] .....	36
Obrázek 21: Schéma způsobu kladení vrstev [15] .....	37
Obrázek 22: Fréza 25E2R032M12-SRD10 .....	39
Obrázek 23: MCV 1270 Power [24] .....	40
Obrázek 24: Rozměry testovaných VBD.....	41
Obrázek 25: Testované VBD – snímky z čela.....	42
Obrázek 26: Testované VBD – snímky hřbetu.....	43
Obrázek 27: Průběh opotřebení hřbetu – graf .....	44
Obrázek 28: Rozdíl životnosti .....	44
Obrázek 29: Ekonomické zhodnocení .....	46

## 9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled obráběných materiálů [2] .....	11
Tabulka 2: Označení tepelného zpracování [7] .....	16
Tabulka 3: Označení mechanického zpracování – stupeň přetváření [4] .....	16
Tabulka 4: Složení a vlastnosti slinutých karbidů WC – Co [15] .....	34
Tabulka 5: Řezné podmínky při testování VBD .....	38
Tabulka 6: Záznam opotřebení hřbetu VBD v závislosti na čase .....	44
Tabulka 7: Hodnoty pro tech.-ekonomické zhodnocení .....	45